



Universitat de Lleida

TREBALL FINAL DE GRAU



ESCOLA
POLITÈCNICA SUPERIOR
UNIVERSITAT DE LLEIDA
INSPIRING THE FUTURE

Estudiant: **Joan Bort Roman**

Titulació: Grau en Enginyeria Mecànica

Títol de Treball Final de Grau: Estudi sobre la influència dels paràmetres d'impressió sobre la resistència a tracció i flexió d'elements impresos en 3D

Director/a: Javier Moreno Blanc

Presentació

Mes: Octubre

Any: 2020

Resum

En els últims anys la impressió 3D ha experimentat un clar creixement gràcies a les millores que s'han produït en aquest sector, tant amb la millora de les tecnologies d'impressió com també la reducció de costos d'aquestes. Això ha fet que cada cop les indústries estiguin implementant més el seu ús. Actualment la impressió 3D es troba en un punt on gairebé tothom que vulgui pot disposar de la seva pròpia impressora i en l'àmbit industrial cada cop s'estan desenvolupant noves tècniques d'impressió per tal d'augmentar les prestacions i tamany dels productes finals.

En aquest treball s'estudiarà la influència que tenen certs paràmetres d'impressió sobre les propietats mecàniques de peces impreses utilitzant la tècnica FDM (Fused Deposition Modelling) i amb el PLA com a material d'impressió. Per això es realitzaran assajos a tracció, seguint la normativa UNE-ISO 527, i a flexió, seguint la normativa UNE-ISO 178.

L'objectiu d'aquest treball és trobar quins paràmetres són més influents sobre els resultats dels assajos i quins valors els maximitzen, per així trobar els paràmetres d'impressió ideals en funció de les prestacions necessàries. Un altre objectiu és també obtenir un ventall de dades més gran sobre les resistències a tracció i flexió del PLA més enllà dels donats pel fabricant en la seva fitxa tècnica.

Resumen

En los últimos años la impresión 3D ha experimentado un claro crecimiento gracias a las mejoras que se han producido en este sector, tanto en la mejora de las tecnologías de impresión como también en la reducción de costes de estas. Esto ha hecho que cada vez las industrias estén implementando más su uso. Actualmente la impresión 3D se encuentra en un punto donde casi todo el que quiera puede disponer de su propia impresora y en el ámbito industrial cada vez se están desarrollando nuevas técnicas de impresión con el fin de aumentar las prestaciones y tamaño de los productos finales.

En este trabajo se estudiará la influencia que tienen ciertos parámetros de impresión sobre las propiedades mecánicas de piezas impresas utilizando la técnica FDM (Fused Deposition Modelling) y con el PLA como material de impresión. Para esto se realizarán ensayos a tracción, siguiendo la normativa UNE-ISO 527, y a flexión, siguiendo la normativa UNE-ISO 178.

El objetivo de este trabajo es encontrar que parámetros son más influyentes sobre los resultados de los ensayos y que valores los maximizan, para así encontrar los parámetros de impresión ideales en función de las prestaciones necesarias. Otro de los objetivos es también obtener un abanico más grande sobre las resistencias a tracción y flexión del PLA más allá de las dadas por el fabricante en la ficha técnica.

Abstract

In the last years 3D printing has experimented a clear growth thanks to the improvements done in this sector, both for the advances in 3D printing technologies and the reduction in the productions costs. Because of this, industries are implementing more and more its use. Now a days 3D printing has reached a point where almost everybody that wants it can have their own 3D printer, and in the industrial field new printing technics are being developed to increase the properties and volumes of the final products.

This essay will study the influence that have some printing parameters in the mechanical properties of 3D printed objects using the FDM technique (Fused Deposition Modelling) and with PLA a printing material. To do so there will be conducted traction test, following the regulation UNE-ISO 572, and flexion tests, following the regulation UNE-ISO 178.

The objective of this essay is to find which of the parameters of study are more influent on the results of the tests and which of its values maximize them, in order to find the ideal printing parameters depending on the needs of the printed object. Another objective is also obtaining a wide range of values of the resistance to traction and flexion of PLA beyond the data given by de manufacturer.

Índex

Resum.....	I
Resumen.....	II
Abstract	III
1. Introducció.	1
1.1. Objectius	1
2. Marc Teòric.....	2
2.1. Introducció a la impressió 3D	2
2.2. Tecnologies d'impressió 3D.....	3
2.2.1. FDM.....	4
2.2.2. SLA	5
2.2.3. SLS.....	6
2.2.4. Material jetting (MJ)	7
2.3. Ventatjes.....	8
2.4. Aplicacions.....	10
3. Disseny d'experiments	13
3.1. Elecció de paràmetres.....	13
3.2. Disseny d'experiments de Taguchi	19
3.2.1. Bases del disseny d'experiments de Taguchi.....	19
3.2.2. Disseny d'experiments	20
4. Part experimental	21
4.1. Normativa.....	21
4.1.1. Proveta tracció.....	21
4.1.2. Proveta flexió	21
4.2. Procediment (Cura/Simplify)	22
4.2.1. Impressió	23
4.2.2. Proves/testos/assajos	26
5. Resultats	28
5.1. Resultats Tracció.....	28
5.2. Resultats Flexió	29
5.3. Tensió màxima a tracció	31
5.4. Mòdul d'elasticitat.....	36
5.5. Tensió màxima a flexió	41
5.6. Mòdul flexió.....	46

5.6. Costos.....	51
6. Discussió dels resultats.....	52
7. Conclusions	55
8. Bibliografia	57
9. Annexos.....	62

Índex de figures

FIGURA 1 CLASSIFICACIÓ DE LES TECNOLOGIES D'IMPRESSIÓ 3D EN FUNCIÓ DE L'ESTAT DEL MATERIAL D'IMPRESSIÓ.	3
FIGURA 2 ESQUEMA DELS COMPONENTS DEL CAP D'IMPRESSIÓ PER IMPRESSORES FDM.....	4
FIGURA 3 ESQUEMA DE FUNCIONAMENT D'UNA IMPRESSORA FDM.....	4
FIGURA 4 ESQUEMA DELS COMPONENTS D'UNA IMPRESSORA SLA.....	5
FIGURA 5 ESQUEMA D'UNA IMPRESSORA SLA AMB LA PLATAFORMA D'IMPRESSIÓ A LA PART SUPERIOR. ...	5
FIGURA 6 ESQUEMA DEL FUNCIONAMENT D'UNA IMPRESSORA SLS.	6
FIGURA 7 ESQUEMA DELS COMPONENTS D'UNA IMPRESSORA MJ.	7
FIGURA 8 PROCES D'IMPRESSIÓ 3D.....	8
FIGURA 9 IMPRESSORES CONVENCIONALS EXPOSADDES AMB ALGUNES IMPRESSIONS	9
FIGURA 10 CICLES DE VIDA DEL PLA.	9
FIGURA 11 PROTOTIP IMPRES EN 3D D'UNA TURBINA.	10
FIGURA 12 PEÇA IMPRESA EN 3D PER UN BOEING 777	10
FIGURA 13 COR IMPRES AMB TECNOLOGIA 3D.....	11
FIGURA 14 PRÒTESIS DE BRAÇ IMPRESA AMB TECNOLOGIA 3D	11
FIGURA 15 CLASSE ON ESTAN TREBALLANT LA IMPRESSIÓ 3D.....	12
FIGURA 16 MOSTRES D'ART FETES AMB IMPRESSIÓ 3D.....	12
FIGURA 17 DIFERENTS ALTURES DE CAPA DE LES PROVETES.....	13
FIGURA 18 GROSSORS DE PARET DE LES PROVETES.....	14
FIGURA 19 DENSITATS D'EMPLENAT DE LES PROVETES	14
FIGURA 20 VELOCITATS D'IMPRESSIÓ DE LES PROVETES.....	15
FIGURA 21 PRINTER SYS 325.....	16
FIGURA 22 CREALITY ENDER 3	16
FIGURA 23 PATRÓ FULL HONEYCOMB PER A LES PROVETES	17
FIGURA 24 ORIENTACIÓ DE LES CAPES I GROSSOR D'AQUESTES	17
FIGURA 25 DIAGRAMA D'UN PROCÉS	19
FIGURA 26 FUNCIÓ DE PÈRDUA DE QUALITAT	19
FIGURA 27 DIMENSIONS DE LA PROVETA PER ASSAIGS A TRACCIÓ.....	21
FIGURA 28 DIMENSIONS DE LA PROVETA PER ASSAIGS A FLEXIÓ.....	21
FIGURA 29 PROCES D'IMPRESSIÓ 3D.....	22
FIGURA 30 MODEL 3D AMB CREO DE LA PROVETA PER ASSAIG A TRACCIÓ.....	22
FIGURA 31 VISUALITZACIÓ DEL ARXIU .STL.....	22
FIGURA 32 MODELS DE LES PROVETES AL SIMPLIFY 3D.....	23
FIGURA 33 PREVISUALITZACIÓ DE LA IMPRESSIÓ	23
FIGURA 34 EXEMPLE D'IMPRESSIÓ D'UN LOT DE PROVETES.	24
FIGURA 35 PROVETA TRENCADA PER UN ERROR D'IMPRESSIÓ.	24
FIGURA 36 RECANVI DE LA PEÇA DE L'EXTRUSOR QUE VA FALLAR.....	25

FIGURA 37 EXTRUSOR I TUB D'ALIMENTAMENT OBSTRUÏTS.....	25
FIGURA 38 PROVETES IMPRESSES AMB LA BOQUILLA TAPONADA.	25
FIGURA 39 ASSAIG A FLEXIÓ AMB MULTITEST 1-D I MECMESIN AFG 1000N	26
FIGURA 40 PROVETA TRENCADA AL FINALITZAR L'ASSAIG A TRACCIÓ.	27
FIGURA 41 IMATGE DE LA HOYTOM HM-20-D.	27

Índex de taules

TAULA 1 FITXA TÈCNICA DEL PLA DE SMART MATERIALS	18
TAULA 2 PARÀMETRES I VARIABLES D'ESTUDI	20
TAULA 3 DISSENY D'EXPERIMENTS SEGUINT LA METODOLOGIA DE TAGUCHI	20
TAULA 4 RESULTATS PER ALS ASSAJOS DE TRACCIÓ	28
TAULA 5 PROVETES AMB MILLORS RESULTATS PER A TENSIÓ MÀXIMA.....	28
TAULA 6 PROVETES AMB MILLORS RESULTATS PER AL MÒDUL D'ELASTICITAT	29
TAULA 7 RESULTATS PER ALS ASSAJOS A FLEXIÓ.....	29
TAULA 8 PROVETES AMB MILLOR RESULTAT PER TENSIÓ MÀXIMA I MÒDUL DE FLEXIÓ	30
TAULA 9 VALORS QUE MAXIMITZEN ELS RESULTATS DE LA TENSIÓ MÀXIMA A TRACCIÓ.....	32
TAULA 10 P-VÀLUES PER ALS DIFERENTS PARÀMETRES	32
TAULA 11 VALORS QUE MAXIMITZEN ELS RESULTATS DEL MÒDUL D'ELASTICITAT	37
TAULA 12 P-VALUE PER ALS DIFERENTS PARÀMETRES	37
TAULA 13 VALORS QUE MAXIMITZEN ELS RESULTATS A LA TENSIÓ MÀXIMA A FLEXIÓ	42
TAULA 14 P-VALUES PER ALS DIFERENTS PARÀMETRES	42
TAULA 15 VALORS QUE MAXIMITZEN ELS RESULTATS DEL MÒDUL DE FLEXIÓ	47
TAULA 16 P-VALUES PER ALS DIFERENTS PARÀMETRES	47

Índex de gràfics

GRÀFIC 1 GRÀFIC DE LA MITJA DELS RESULTATS DE LA TENSIÓ MÀXIMA A TRACCIÓ.....	31
GRÀFIC 2 GRÀFIC D'INTERACCIÓ ENTRE ELS PARÀMETRES QUE AFECTEN LA PROVETA DIRECTAMENT	33
GRÀFIC 3 GRÀFIC S/N PER TENSIÓ MÀXIMA A TRACCIÓ.....	34
GRÀFIC 4 GRÀFIC DE RESIDUS PER TENSIÓ MÀXIMA A TRACCIÓ.....	35
GRÀFIC 5 GRÀFICA DELS VALORS MITJANS DEL MÒDUL D'ELASTICITAT	36
GRÀFIC 6 GRÀFIC D'INTERACCIÓ DE PARÀMETRES	38
GRÀFIC 7 GRÀFIC S/N PER MÒDUL D'ELASTICITAT	39
GRÀFIC 8 GRÀFIC DE RESIDUS PER AL MÒDUL D'ELASTICITAT	40
GRÀFIC 9 GRÀFIC DELS VALORS MITJANS PER A LA TENSIÓ MÀXIMA A FLEXIÓ	41
GRÀFIC 10 GRÀFIC D'INTERACCIÓ DE PARÀMETRES	43
GRÀFIC 11 GRÀFIC S/N PER TENSIÓ MÀXIMA A FLEXIÓ	44
GRÀFIC 12 GRÀFIC DE RESIDUS PER A LA TENSIÓ MÀXIMA A FLEXIÓ	45
GRÀFIC 13 GRÀFICA DELS VALORS MITJANS DEL MÒDUL DE FLEXIÓ.....	46
GRÀFIC 14 GRÀFIC D'INTERACCIÓ DE PARÀMETRES	48
GRÀFIC 15 GRÀFIC S/N PEL MÒDUL DE FLEXIÓ	49
GRÀFIC 16 GRÀFIC DE RESIDUS PER AL MÒDUL DE FLEXIÓ.....	50

1. Introducció.

1.1. Objectius

Els objectius principals d'aquest treball són saber la influència que té cadascun dels paràmetres d'estudi sobre les propietats mecàniques, més concretament es faran testos per conèixer el comportament de les provetes a tracció i a flexió. Un cop es conegui quins paràmetres són més influents sobre els resultats es buscarà la combinació d'aquests amb la que s'obtindrien els millors resultats en els assajos.

Això es farà seguint la normativa UNE-ISO per assajos a tracció i flexió, amb els quals obtenir la tensió màxima a tracció, el mòdul d'elasticitat, la tensió màxima a flexió i el mòdul de flexió.

Un altre objectiu és contrastar la informació sobre les propietats mecàniques del material d'impressió donades pel fabricant i també tenir dades sobre aquestes per als diferents paràmetres d'impressió.

2. Marc Teòric

2.1. Introducció a la impressió 3D

S'entén la impressió 3D, també coneguda com a fabricació additiva, com a la creació d'un objecte tridimensional a partir de la superposició de capes successives de material. Per fer això es parteix de la idea del producte final i es plasma amb un software CAD per crear un objecte tridimensional, aquest després es separa per capes amb un slicer i finalment es procedeix a imprimir i obtenir el producte final. Ofereix una opció més ràpida, barata i fàcil d'usar en comparació amb altres processos industrials.

A pesar de semblar una tecnologia moderna trobem els seus orígens als anys 80, on es desenvolupa la impressió 3D per estereolitografia (SLA). A finals d'aquesta dècada també es desenvolupen el sinteritzat làser selectiu (SLS) i el modelat per deposició fosa (FDM).

A partir d'aquest moment s'han anat perfeccionant aquestes tècniques fins al punt de fer-les assequibles per tothom, i també no s'han parat de desenvolupar noves tècniques per tal d'aconseguir unes prestacions sobre els productes finals per fer-los competitiu amb d'altres amb tècniques tradicionals. El procés d'impressió 3D també ha agilitzat els processos de prototipatge passant de durar aquestes setmanes a dies o inclús hores.

Actualment la impressió 3D es troba en un punt on té una gran influència en sectors tan importants com el mèdic, imprimint rèpliques d'òrgans per poder visualitzar-los millor o inclús models funcionals d'alguns òrgans, també té una gran importància en el sector odontològic, arribant a imprimir pròtesis i en l'àmbit industrial s'estan utilitzant peces impreses amb 3D en sectors com l'aeroespacial i l'automoció.

La previsió de futur de la impressió 3D és que és un sector que no parerà de créixer i d'anar innovant, amb unes perspectives molt bones en els propers anys.

2.2. Tecnologies d'impressió 3D

Dintre de les tecnologies d'impressió 3D destaquen les que usen tecnologies de prototipatge ràpid, aquestes consisteixen en primer realitzar un model 3D amb un software CAD, on es guarda l'arxiu com .stl, seguidament es passa aquest arxiu a un altre software, slicer, on separa el model 3D per capes. Aquestes capes determinen el recorregut dintre les coordenades X i Y, i la coordenada Z vindrà definida per l'altura de capa corresponent.

Les tecnologies de prototipatge ràpid es poden classificar segons els mètodes de crear les capes on trobem impressió per injecció, modelat per deposició fosa (FDM), estereolitografia (SLA), fotopolimerització per llum ultra violeta (SGC) o fotopolimerització per absorció de fotons (SLS).

També es poden classificar segons l'estat en que es troba el material d'impressió en el moment de la impressió on es diferencia entre líquid, pols, gas o làmines.

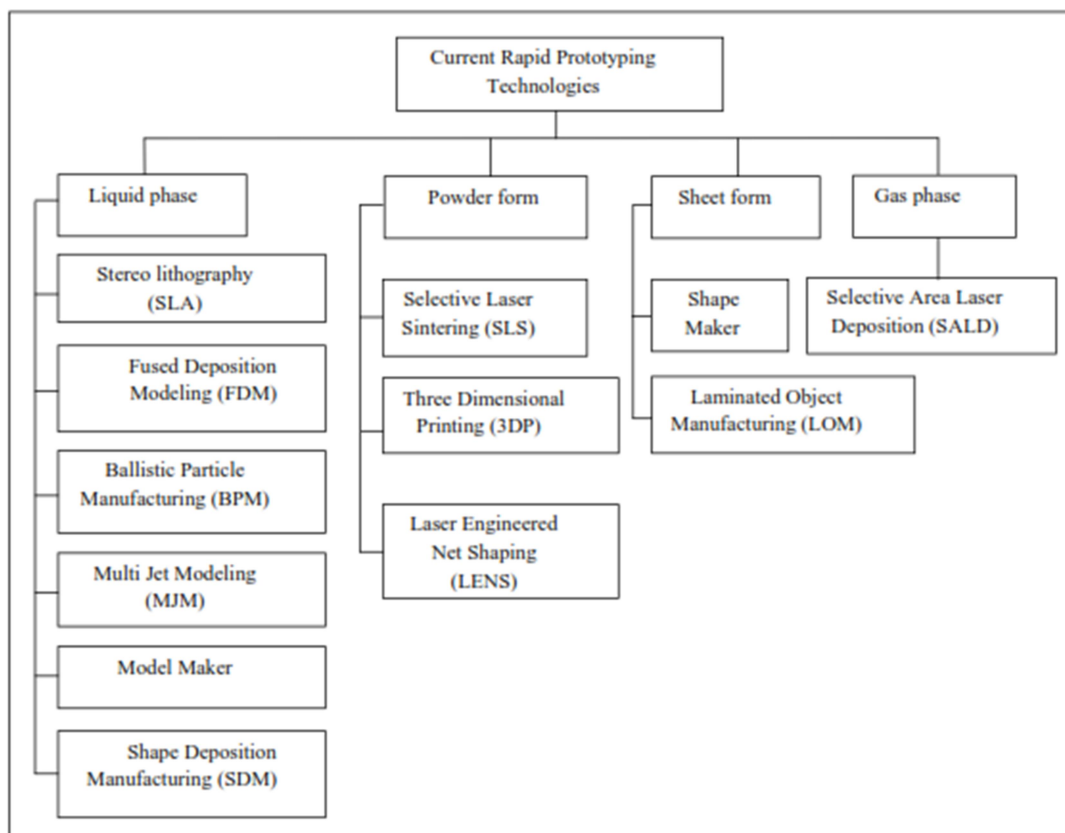


Figura 1 Classificació de les tecnologies d'impressió 3D en funció de l'estat del material d'impressió.

D'entre totes les tecnologies les més utilitzades en la indústria i que s'entrarà en detall a continuació són el modelat per deposició fosa (FDM), la estereolitografia (SLA), fotopolimerització per absorció de fotons (SLS) i material jetting (MJ).

2.2.1. FDM

El modelat per deposició fosa es el procés més estès i amb més usuaris actualment, i la que s'utilitza per realitzar aquest treball, degut a la seva senzillesa i ser una opció assequible per imprimir en 3D. Degut això hi ha una gran varietat de materials per fer les impressions com ara PLA, ABS, PETG, Nylon, TPE, TPU, HIPS i PC entre d'altres, per imprimir les provetes utilitzarem el PLA.

Aquesta tecnologia es basa en tres elements principals: una base d'impressió on s'imprimeix la peça, una bobina de fil amb el material d'impressió desitjat i un extrusor que és el que fon i deposita el material capa per capa.

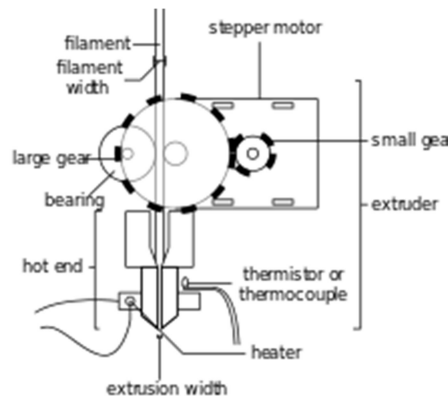


Figura 2 Esquema dels component del cap d'impressió per impressores FDM.

El funcionament d'aquestes impressores es basa en depositar material fos de la forma pertinent per obtenir el model 3. Això s'aconsegueix calentant l'extrusor fins arribar a la temperatura desitjada per tal de fondre el material, un cop aquí es comença a extruir material fos sobre la base a través de la boquilla que es mou sobre els eixos x i y. Un cop finalitzada cada capa l'extrusor ascendeix per tal de repetir aquest procediment i imprimir una nova capa fins que la impressió de totes les capes hagi finalitzat.

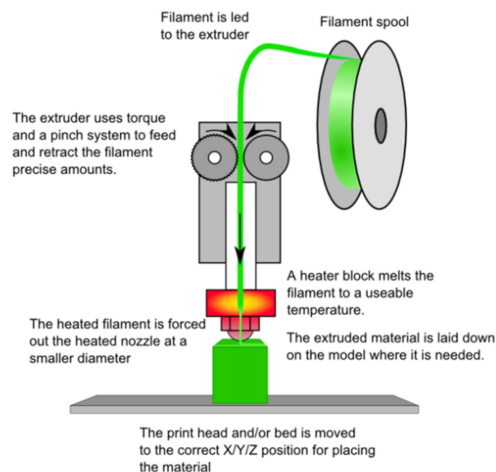


Figura 3 Esquema de funcionament d'una impressora FDM.

2.2.2. SLA

La estereolitografia, o SLA, és una de les tècniques més populars, a part de ser la pionera en impressió 3D. Funciona gràcies a un làser d'alta potència que endureix la resina líquida per crear la forma desitjada capa a capa.

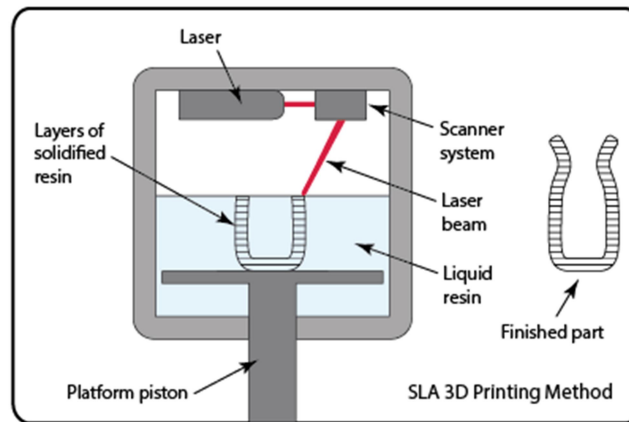


Figura 4 Esquema dels components d'una impressora SLA.

Quan la impressió comença, el làser dibuixa la primera capa sobre la resina fotosensible, solidificant-la en quant entren en contacte. Aquest làser es dirigeix a les coordenades corresponents gràcies a un mirall controlat per ordinador. Després de la primera capa es mou la plataforma d'impressió permetent fluïr la resina per sota de les parts ja impreses i solidificar la següent capa, aquest procediment es repeteix fins que s'ha completat el model.

Aquest tipus d'impressió pot funcionar tal com es mostra a la figura anterior o del revés, amb la plataforma d'impressió a la part superior i creant el model 3D cap per baix, en aquest cas gairebé sempre seran necessaris suports per una correcta impressió.

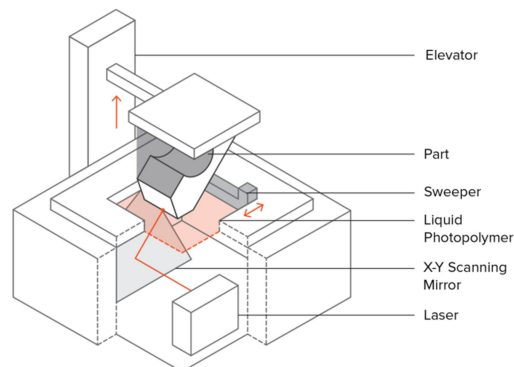


Figura 5 Esquema d'una impressora SLA amb la plataforma d'impressió a la part superior.

Finalment un cop acabada la peça serà necessari un curat final en un forn UV per tal d'aconseguir la màxima resistència possible del material.

En quant als materials utilitzats hi ha un ampli ventall de possibilitats que van des de resines estàndards fins a resines per odontologia passant per resines més resistents, elàstiques o per materials sanitaris.

2.2.3. SLS

El sinteritzat selectiu per làser és una tecnologia d'impressió 3D que utilitza una font de calor, un recipient on es disposa la pols la qual es porta al punt de fusió mitjançant un làser convertint aquesta pols en una peça sòlida.

El procés comença amb un recipient del polímer en pols que es calenta fins una temperatura lleugerament inferior al seu punt de fusió, a continuació una fulla diposita una capa fina sobre la plataforma d'impressió. Llavors un làser escaneja i sinteritza la pols i la solidifica, aquest làser s'enfoca de la mateixa forma que amb la tecnologia SLA. Per imprimir utilitzant aquesta tècnica no són necessaris els suports ha que la mateixa pols que no s'ha solidificat fa a la vegada de suport.

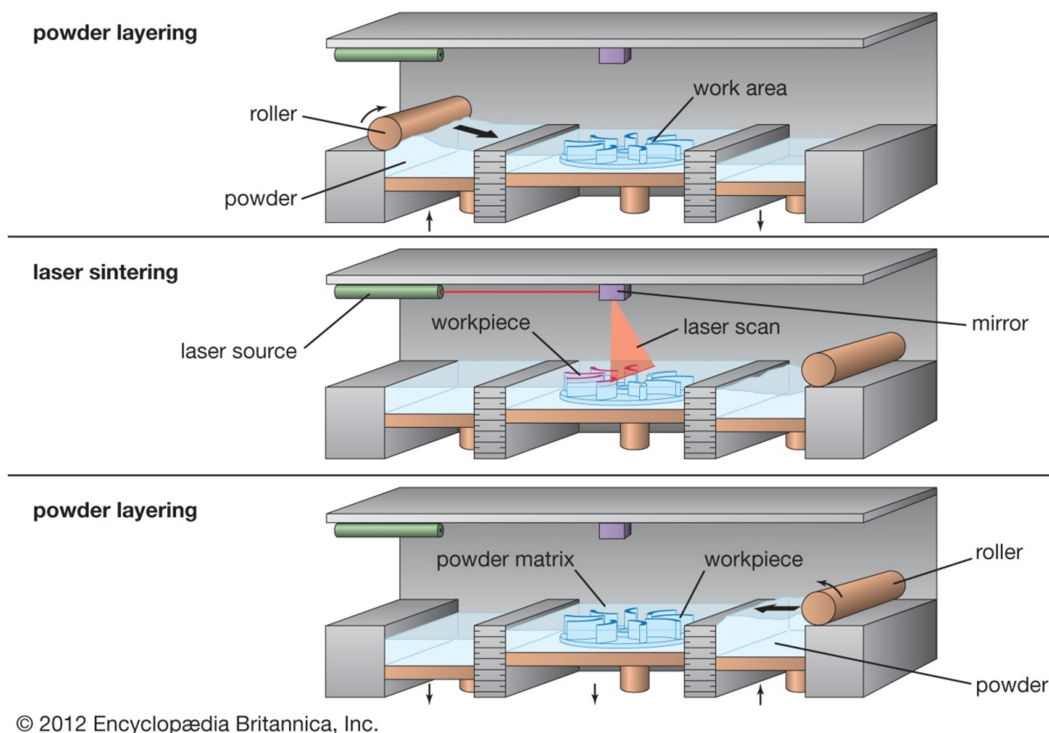


Figura 6 Esquema del funcionament d'una impressora SLS.

Els materials utilitzats per aquestes impressores solen ser materials amb baixa conductivitat tèrmica, sent quasi exclusivament poliamida, un tipus de polímer. Aquest material ofereix bones qualitats tècniques però no disposa d'una ampla gama de colors.

2.2.4. Material jetting (MJ)

Les impressores Material jetting (MJ) creen objectes a partir de gotes de fotopolimers líquids que es curen amb llum UV, és una de les tecnologies 3D més ràpides i precises disponibles.

Els principals components d'aquestes màquines són els caps d'impressió, llum UV, plataforma d'impressió i el recipient per al material. La impressió comença introduint les resines al recipient i calentant-les fins que obtenen la viscositat adequada. Un cop s'ha arribat a la temperatura ideal el capçal de l'eix x viatja a través de la plataforma d'impressió llençant a través dels diferents caps d'impressió gotes diminutes de resina, això ve seguit d'una font de llum UV que cura i endureix immediatament la resina dipositada. Aquest procés es repeteix capa a capa fins aconseguir l'objecte desitjat.

Una de les ventatjes d'aquesta tecnologia és que cada capa d'impressió pot imprimir un material diferent, permetent imprimir materials solubles com a suports o diferent colors de material. En quant als materials disponibles trobes des de resines estàndard a flexibles, transparents o resistents a la temperatura.

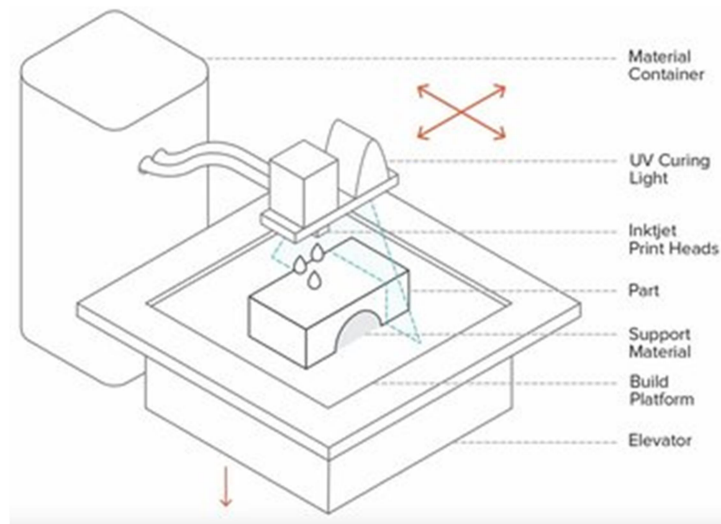


Figura 7 Esquema dels components d'una impressora MJ.

Alguns dels inconvenients d'aquesta tecnologia són l'alt cost que té, tant de les màquines com del material utilitzat. A part les impressions són febles estructuralment, per tant no es podrien utilitzar per suportar càrregues.

2.3. Ventatjes

La impressió 3D representa un gran avanç en quant a la producció d'objectes tridimensionals respecte mètodes com ara la fabricació subtractiva, on s'obté el producte final extraient material d'un bloc sòlid, ja sigui manualment o usant maquinària CNC, o el moldejat, on perquè sigui rentable es necessari produir en grans quantitats.

D'entre totes les ventatjes que implica la impressió 3D destaquen la velocitat, cost, flexibilitat, competitivitat i tangibilitat, reducció de riscos, accessibilitat i sostenibilitat.

Velocitat

És una de les principals ventatjes ja que gràcies a les tècniques de prototipatge ràpid, que permet passar d'un model CAD al producte final en un temps realment baix en comparació amb altres tècniques. A més permet fer modificacions en el model CAD si s'ha de fer algun canvi i tenir novament el nou model amb les modificacions fetes en el temps que costaria imprimir-lo.

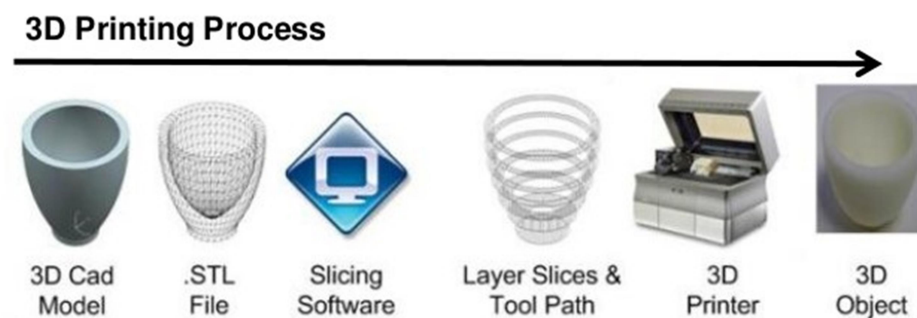


Figura 8 Proces d'impressió 3D.

Cost

El cost és una ventatja per produir petites quantitats ja que per altres mètodes com el mecanitzat CNC i el moldejat per injecció són necessàries màquines més cares a part d'operadors especialitzats, i en el mecanitzat CNC es desperdicia una part del material.

Amb la impressió 3D les màquines són més barates i són necessaris menys operaris per aconseguir el producte final, també hi ha menys desperdici de material i no sol ser necessari cap mecanitzat addicional.

Flexibilitat

Aquesta és una de les grans ventatjes, per flexibilitat s'entén que qualsevol impressora pot crear el que es vulgui dintre del seu volum d'impressió, es poden crear geometries que amb les tècniques tradicionals seria impossible i també la possibilitat d'imprimir amb més d'un material en un mateix objecte.

Competitivitat i Tangibilitat

La competitivitat ve de la velocitat i el cost, els quals permeten millorar i perfeccionar el producte en poc temps i a baix cost.

Un altre punt de la competitivitat és la capacitat de tenir un prototip tangible en lloc de dependre de la imaginació, cosa que podria portar a errors.

Reducció de riscos

Com s'ha mencionat en altres ventatjes, la impressió 3D permet obtenir un prototip a un baix cost i verificar que és el que és vol abans d'haver de fer una gran inversió que podria no sortir bé.

Accessibilitat

La impressió 3D és accessible per a gairebé tothom, a part de tenir un cost molt inferior en comparació a les tècniques tradicionals i el poc espai que es necessita, hi ha moltes impressores que no són molt més grans que una impressora normal, la facilitat per utilitzar una impressora 3D han fet que sigui tant accessible, tenint així un gran nombre de persones que té la impressió 3D com un hobby.



Figura 9 Impressores convencionals exposades amb algunes impressions

Sostenibilitat

Gràcies a la impressió 3D s'han de produir fora de la mateixa empresa menys parts, cosa que fa que es redueixi l'impacte ambiental ja que es redueixen els transports. També desperdicia menys material que les tècniques convencionals i a més hi ha molts materials d'impressió que són reciclables i d'altres biodegradables com el PLA.



Figura 10 Cicles de vida del PLA.

2.4. Aplicacions

Amb el pas del temps, des dels principis de la impressió 3D fins l'actualitat, s'han anat desenvolupant noves aplicacions juntament amb el mateix desenvolupament de noves tècniques i perfeccionant-les. Cada vegada s'està usant més la impressió 3D en sectors com ara; el mèdic, la indústria i l'educació entre d'altres.

Prototipatge i fabricació

El prototipatge va ser el motiu del desenvolupament de la impressió 3D per tal d'agilitzar aquest procés, cosa que ha aconseguit i actualment es pot obtenir un prototip en hores en lloc de dies o setmanes.

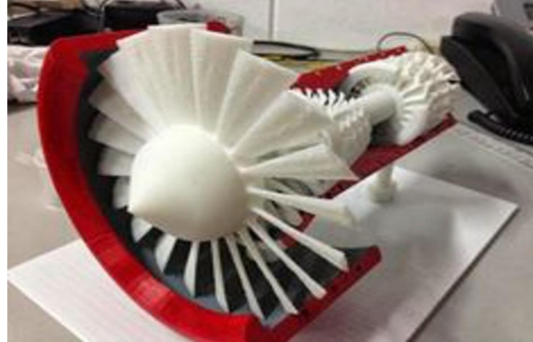


Figura 11 Prototip impres en 3D d'una turbina.

En produccions que no s'han de fer en massa la impressió 3D aporta una opció més econòmica per produir volums més petits o productes únics. Partint d'aquí s'han desenvolupat materials i processos d'impressió, com ara SLS, que ofereixen la opció d'obtenir el producte final i no només un prototip.



Figura 12 Peça impresa en 3D per un Boeing 777

Alguns dels sectors que s'han vist beneficiats són l'automobilístic, aeroespacial, informàtic, robòtic i construcció entre d'altres.

Mèdiques

En els últims anys han sorgit moltes aplicacions de la impressió 3D en el món de la medicina. Una de les quals ve de la bioimpressió, on s'imprimeixen cèl·lules i factors de creixement combinats per crear teixits i estructures imitant els seus equivalents naturals.

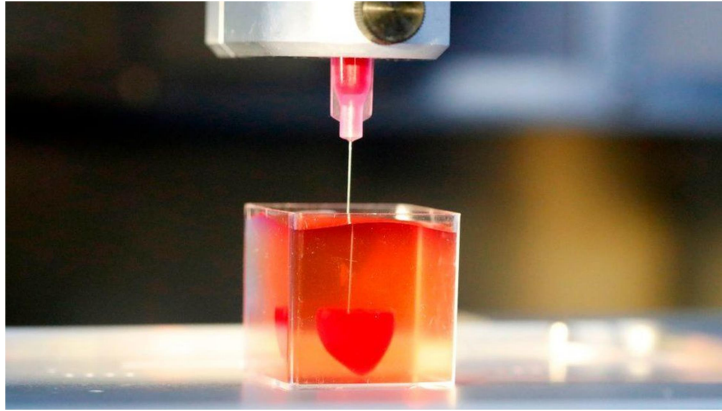


Figura 13 Cor impres amb tecnologia 3D

Un altra aplicació és la fabricació de pròtesis, les quals es poden fer específiques per cada pacient per tal d'adaptar-se a ells i les seves necessitats, i també són modelades i impreses a un cost bastant inferior que d'altres. Dintre d'aquí també es poden tenir en compte les peces per odontologia.



Figura 14 Pròtesis de braç impresa amb tecnologia 3D

Socioculturals

Dintre d'aquest apartat es pot diferenciar entre l'educació, l'ús domèstic, l'art i la joieria. En l'àmbit educacional permet passar d'idees i imatges en paper a la creació d'un objecte físic, d'aquesta manera els estudiants aprenen sobre la impressió 3D i creen prototips o models que són útils per l'aprenentatge.



Figura 15 Classe on estan treballant la impressió 3D

La impressió 3D com a hobby és el que fa de l'ús domèstic d'aquesta una de les aplicacions amb més usuaris, els quals poden imprimir el que vulguin dintre de les possibilitats de les seves impressores.

I finalment l'art i la joieria es una aplicació inesperada de la impressió 3D però que ha anat guanyat pes oferint la possibilitat d'aconseguir formes i dissenys impossibles amb els mètodes tradicionals, a part de poder fer peces úniques i personalitzades a costos baixos.



Figura 16 Mostres d'art fetes amb impressió 3D

3. Disseny d'experiments

Per tal de dur a terme aquest projecte es necessari realitzar un disseny d'experiments per tal de tenir en compte tots els paràmetres i variables d'aquests.

Els paràmetres escollits per analitzar són altura de capa, grossor de les parets, densitat de les provetes, velocitat d'impressió, temperatura d'impressió i dues impressores.

I per tal de tenir en compte tots els paràmetres anteriors i no haver d'imprimir una quantitat excessiva de provetes el disseny d'experiments es realitzarà per la DOE de Taguchi.

3.1. Elecció de paràmetres

Els paràmetres han estat escollits perquè he cregut que podrien tenir major influència sobre la resistència a tracció i flexió de les provetes, i imprimir en dues impressores ha estat per comprovar si hi ha diferències entre una impressora per aficionats a la impressió 3D i una de professional.

Per l'elecció dels valors dels diferents paràmetres he buscat quins són els més usats habitualment tenint en compte també valors que podrien ser usats en peces que necessitarien més prestacions.

Altura de capa

La altura de capa és el grossor de material que es disposa en cada capa de la impressió. Quant menor sigui més capes hi haurà però també més unions entre capes que poden afectar a la resistència, en canvi com més gran menor nombre de capes i menys unions entre capes.

Els valors escollits per l'altura de capa de les provetes són: 0.1mm, 0.2mm, 0.3 mm.

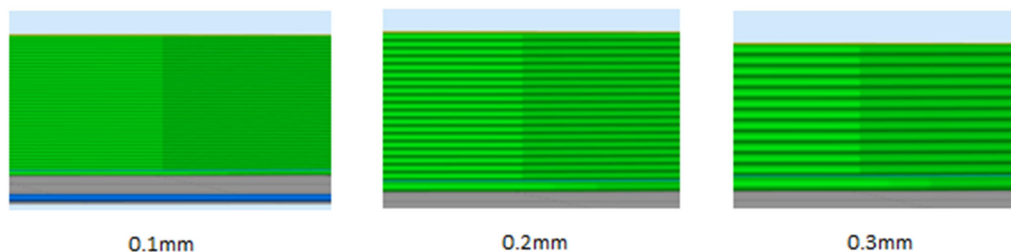


Figura 17 Diferents altures de capa de les provetes

Grossor parets

El grossor de les parets és el número capes externes sòlides que s'imprimeixen a les peces, a més capes més grossor, i al tenir major grossor aquest fet podria augmentar la resistència.

Els valors escollits són 0.8mm, que són dues voltes amb una boquilla de 0.4mm, 1.2mm, que són 3 voltes, i 1.6mm que són 4 voltes.

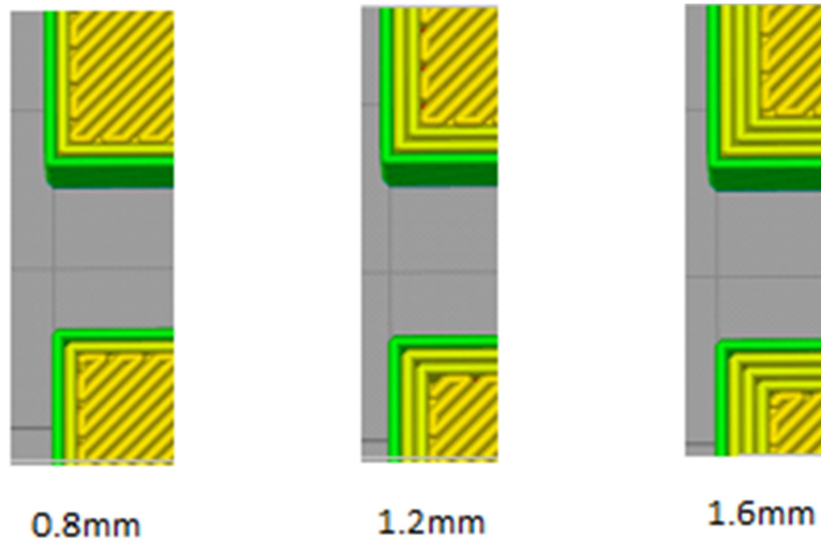


Figura 18 Grossors de paret de les provetes

Densitat

La densitat és la quantitat de material que s'imprimeix en l'espai que queda entre les parts i els límits superior i inferior. Les impressions que no necessiten suportar càrregues es poden imprimir a densitats del 20% o inferiors.

Per fer l'anàlisi per peces que possiblement estiguin sotmeses a càrregues els valors de densitat escollits han estat 40%, 60% i 80%.

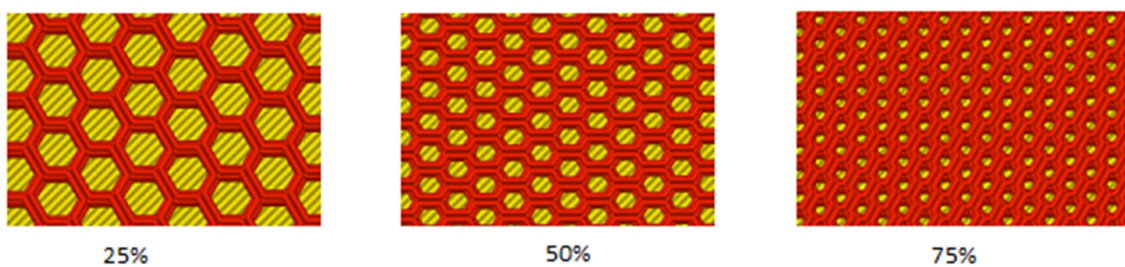


Figura 19 Densitats d'emplenat de les provetes

Velocitat d'impressió

La velocitat d'impressió és la velocitat a la qual es deposita el material durant la impressió, les velocitats escollides són 40, 60, 80 mm/s. Aquestes velocitats s'han escollit perquè per velocitats sobre els 50mm/s s'obté un bon equilibri de velocitat/qualitat, d'aquesta manera s'obtindrà informació per rangs inferiors i superiors. També per geometries simples es pot augmentar la velocitat sense afectar gaire a la qualitat.

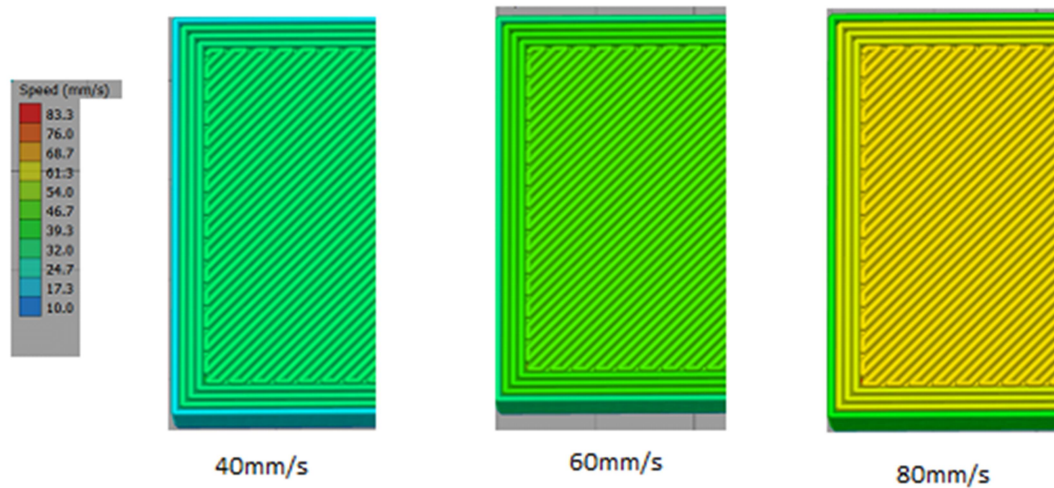


Figura 20 Velocitats d'impressió de les provetes

Temperatura

La temperatura d'impressió és la temperatura a la qual es troba el material a l'hora d'imprimir. Els valors escollits són 200°, 210° i 220°, aquest tres valors venen definits pel rang de temperatures d'impressió que recomana el fabricant del material.

Dues impressores

Durant el disseny de l'experiment va sorgir l'oportunitat d'imprimir les provetes amb dues impressores, una de professional i l'altra de domèstica de qualitat inferior. Les impressores són Printersys 325 i la Creality Ender 3.

Les especificacions de les dues impressores es trobaran als annexes.

Printersys 325

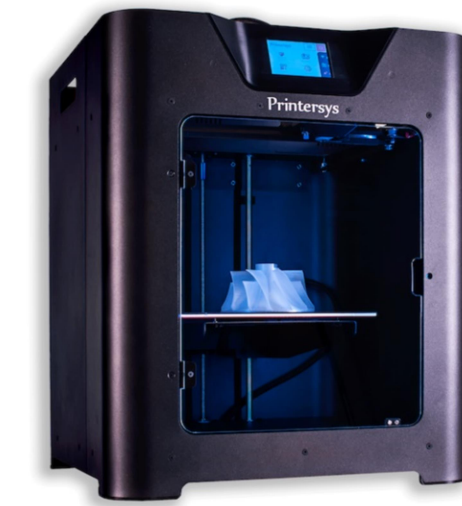


Figura 21 Printersys 325

Creality Ender 3



Figura 22 Creality Ender 3

Paràmetres fixos

A part dels paràmetres variables n'hi ha que no variaran en la impressió de les diferents provetes. Aquests són el patró d'emplenament, el grossor de les capes superior e inferior, el diàmetre de la boquilla de l'extrusor i el material d'impressió.

Patró d'emplenament

D'entre totes les possibilitats que ofereix el programa Simplify 3D el patró d'emplenament escollit ha estat el “full honeycomb”, que segueix el patró hexagonal dels panels de mel, però en cada capa s'imprimeix en una direcció diferent.

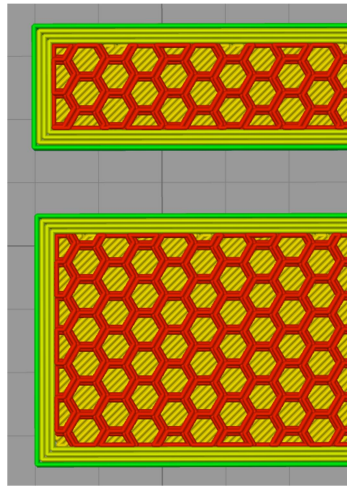


Figura 23 Patró full honeycomb per a les provetes

Grossor top/bottom

Aquest paràmetre és el que defineix el grossor de les capes sòlides superiors i inferiors, aquest paràmetre s'ha fixat en 0.8mm, on depenent de l'altura de capa n'hi haurà més o menys. Aquestes capes s'imprimiran amb orientacions de 45° i -45° alternades.

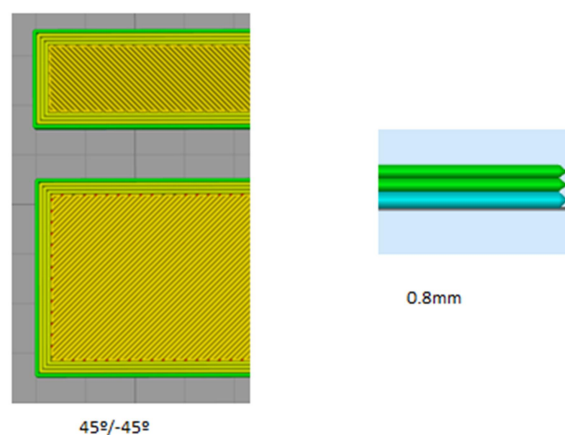


Figura 24 Orientació de les capes i grossor d'aquestes

Diàmetre boquilla

Aquest és un altre paràmetre fix i s'imprimiran totes les provetes amb una boquilla amb un diàmetre de sortida del material de 0.4mm.

Material

El material escollit per dur a terme les impressions i així comprovar també que les dades aportades pel fabricant són correctes ha estat el PLA. Més concretament PLA de Smart Materials.

Taula 1 Fitxa tècnica del PLA de Smart Materials

Physical Properties	Typical Value	Test Method
Material Density	1,24 g/cm³	ISO 1183
Chemical Name	Polylactic Acid	
Glass Transition Temperature	55-60 °C	D3418
Mechanical Properties	Typical Value	Test Method
Tensile Strength at Break	53 MPa	D882
Tensile Modulus	3.6 GPa	D882
Tensile Yield Strength	60 MPa	D882
Tensile Elongation	6 %	D882
Notched Izod Impact	16 J/m	D256
Flexural Strength	83 MPa	D790
Flexural Modulus	3.8 GPa	D790
Thermal Properties	Typical Value	Test Method
Heat Distortion Temperature (0.45 MPa)	55 °C	E2092
Printing Properties	Typical Value	
Print Temperature	220±20 °C	
Hot Pad	0-60 °C	
Fan Layer	On (100%)	

3.2. Disseny d'experiments de Taguchi

3.2.1. Bases del disseny d'experiments de Taguchi

El disseny d'experiments de Taguchi, també conegut com disseny robust, es una metodologia que el que busca es reduir la variabilitat al final dels processos. Per això es busca eliminar o minimitzar els efectes dels sorolls i no els sorolls com a tal.

Aquesta variabilitat dels processos venen provocats per paràmetres que no es poden controlar denominats sorolls de procés. El disseny d'experiments ens permet analitzar quins efectes tenen els sorolls sobre els processos de forma quantitativa. Aquesta relació s'obté ajuntant-se d'una part experimental, d'aquesta manera es pot conèixer el pes de cada font de soroll sobre la variabilitat del procés.

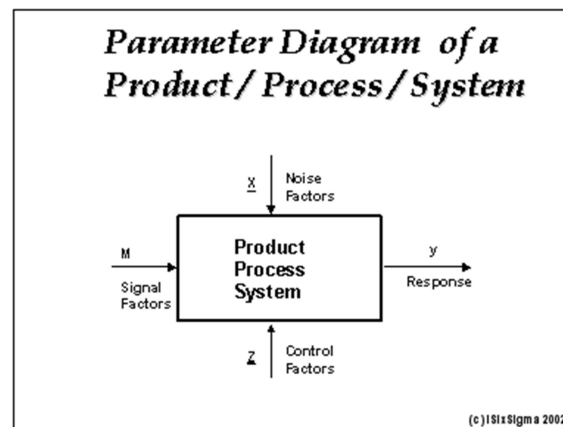


Figura 25 Diagrama d'un procés

La funció de pèrdua del qualitat de Taguchi permet calcular i quantificar la distància a la que ens trobem respecte al punt objectiu d'un paràmetre en particular. Aquest valor es calcula com a pèrdues monetàries, com més allunyat del punt objectiu major serà la pèrdua monetària associada.

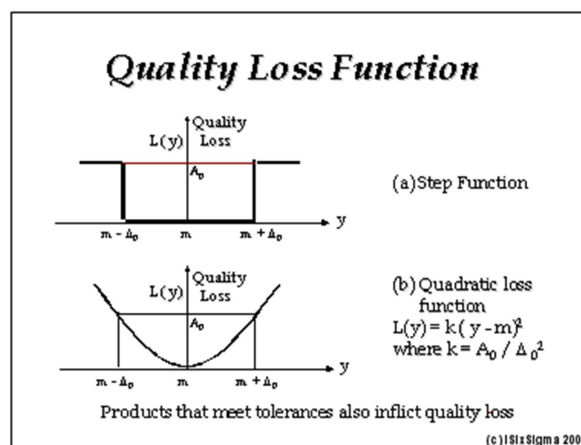


Figura 26 Funció de pèrdua de qualitat

3.2.2. Disseny d'experiments

Realitzar un disseny d'experiments tradicional amb tants paràmetres implicaria imprimir un nombre exageradament elevat de provetes per tenir en compte totes les combinacions possibles entre paràmetres i les variables d'aquests. Per això s'ha escollit realitzar el disseny d'experiments mitjançant el mètode de Taguchi.

El mètode de Taguchi utilitza arranjaments ortogonals per tal de reduir el nombre d'experiments a realitzar per als mateixos paràmetres i tenint en compte totes les variables d'aquestes. Les paràmetres i variables d'estudi són les que es troben a la següent taula.

Taula 2 Paràmetres i variables d'estudi

	Paràmetres	Variables
A	Impressora	Ender 3 – Printersys 325
B	Altura de cama (mm)	0.1 – 0.2 – 0.3
C	Grossor paret (mm)	0.8 – 1.2 – 1.6
D	Densitat (%)	25 – 50 – 75
E	Velocitat (mm/s)	40 – 60 – 80
F	Temperatura d'impressió (°C)	200 – 210 – 220

Per aquest estudi s'ha optat per un disseny amb 18 experiments amb un factor amb dues variables i cinc factors amb tres variables.

Taula 3 Disseny d'experiments seguint la metodologia de Taguchi

Nº experiment	A	B	C	D	E	F
1	1	0,1	0,8	25	40	200
2	1	0,1	1,2	50	60	210
3	1	0,1	1,6	75	80	220
4	1	0,2	0,8	25	60	210
5	1	0,2	1,2	50	80	220
6	1	0,2	1,6	75	40	200
7	1	0,3	0,8	50	40	220
8	1	0,3	1,2	75	60	200
9	1	0,3	1,6	25	80	210
10	2	0,1	0,8	75	80	210
11	2	0,1	1,2	25	40	220
12	2	0,1	1,6	50	60	200
13	2	0,2	0,8	50	80	200
14	2	0,2	1,2	75	40	210
15	2	0,2	1,6	25	60	220
16	2	0,3	0,8	75	60	220
17	2	0,3	1,2	25	80	200
18	2	0,3	1,6	50	40	210

Aquest disseny d'experiments seguint la metodologia de Taguchi s'ha fet mitjançant el programa Minitab 17.

4. Part experimental

4.1. Normativa

Un cop fet el disseny d'experiments es procedeix a realitzar la part experimental. En aquest apartat s'escollirà la normativa a seguir per realitzar els assajos, com es realitzaran assajos a tracció i flexió cadascun haurà de seguir una normativa diferent. Per als assajos a tracció s'ha escollit la normativa UNE-ISO 527 i per als assajos a flexió la UNE-ISO 178.

4.1.1. Proveta tracció

Seguint la normativa UNE-ISO 527 la proveta per realitzar els assajos a tracció ha de tenir les mesures següents:

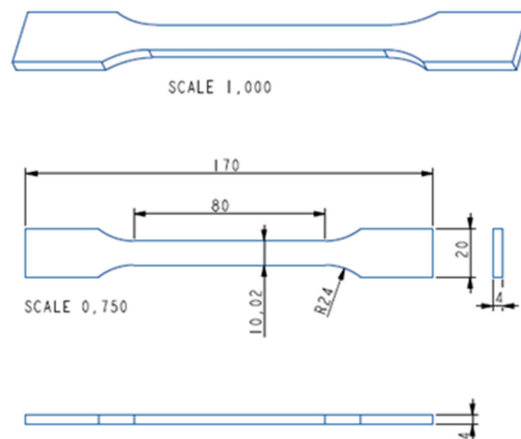


Figura 27 Dimensions de la proveta per assaigs a tracció

4.1.2. Proveta flexió

Seguint la normativa UNE-ISO 178 la proveta per realitzar els assajos a flexió ha de tenir les mesures següents:

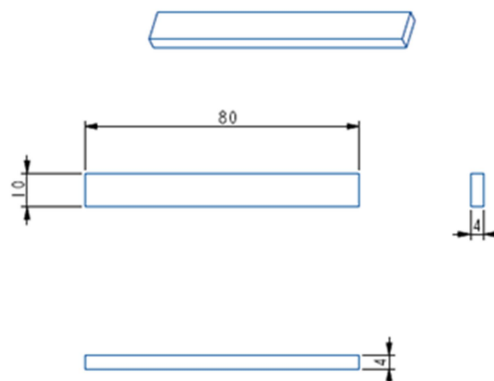


Figura 28 Dimensions de la proveta per assaigs a flexió

4.2. Procediment (Cura/Simplify)

Un cop s'ha decidit la normativa a utilitzar per realitzar els assajos es precedeix a crear les provetes mitjançant el prototipatge ràpid.

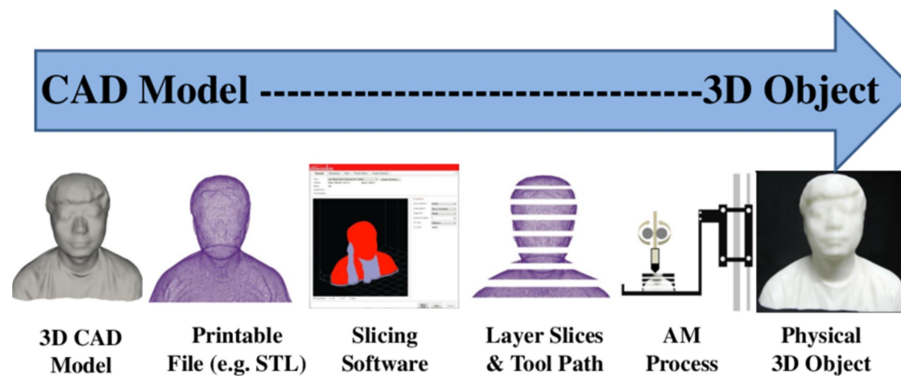


Figura 29 Proces d'impressió 3D

Es comença creant els models 3D de les provetes amb el programa CREO, per tal de passar els arxius al slicer s'han de guardar amb el format .stl, el qual agafa l'objecte 3D i el subdivideix en triangles.

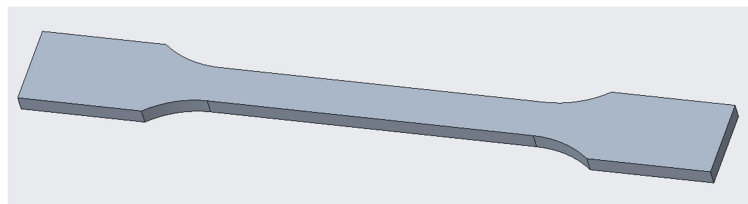


Figura 30 Model 3D amb CREO de la proveta per assaig a tracció

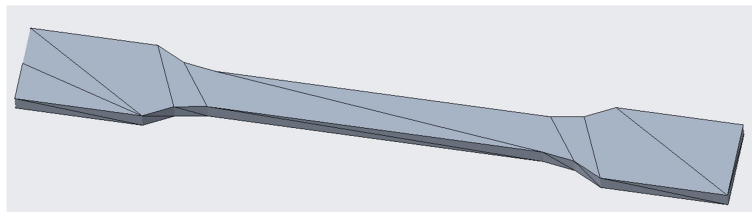


Figura 31 Visualització del arxiu .stl

Aquests arxius .stl després s'ha d'obrir amb un slicer, un programa que divideix l'objecte 3D en capes, en aquest cas s'ha utilitzat el programa Simplify3D.

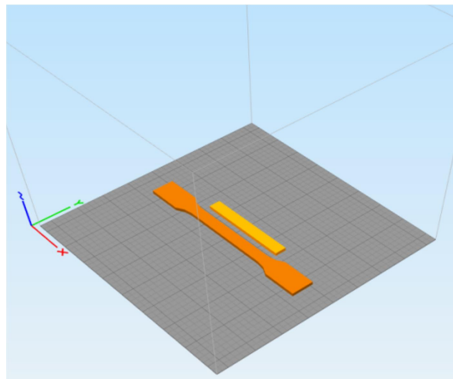


Figura 32 Models de les provetes al Simplify 3D

Un cop introduïts els arxius .stl al slicer es defineixen els paràmetres d'impressió i es prepara un arxiu .gcode que és el que és passarà a la impressora per imprimir.

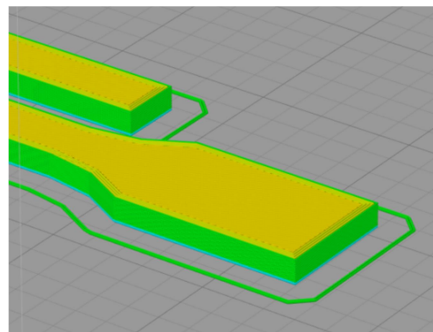


Figura 33 Previsualització de la impressió

4.2.1. Impressió

Un cop es tenen tots els arxius .gcode per cada combinació de paràmetres de les provetes es passen a una targeta de memòria per introduir-les a la impressora. Abans de començar a imprimir és important tenir ben anivellada la base d'impressió per tal d'evitar que hi hagi parts més elevades que altres i que provocarien resultats no desitjats en les dimensions finals i a part pot arribar a rascar la base amb la boquilla.

Un cop anivellada la base d'impressió es procedeix a imprimir les provetes, però abans s'ha aplicat una laca, 3DLAC, per tal de millorar l'adhesió a la base. Un cop s'ha iniciat la impressió només queda esperar a que s'acabi a que es completen les provetes i anar comprovant que s'estan imprimint correctament. Ja finalitzada la impressió es procedeix a separar amb compte les provetes de la base d'impressió per no trencar-les no sotmetre-les a esforços excessius.

En quant als temps d'impressió ha hagut bastanta diferència entre els temps estimats pel Simplify3D i el temps real d'impressió amb diferències de fins a dues hores.

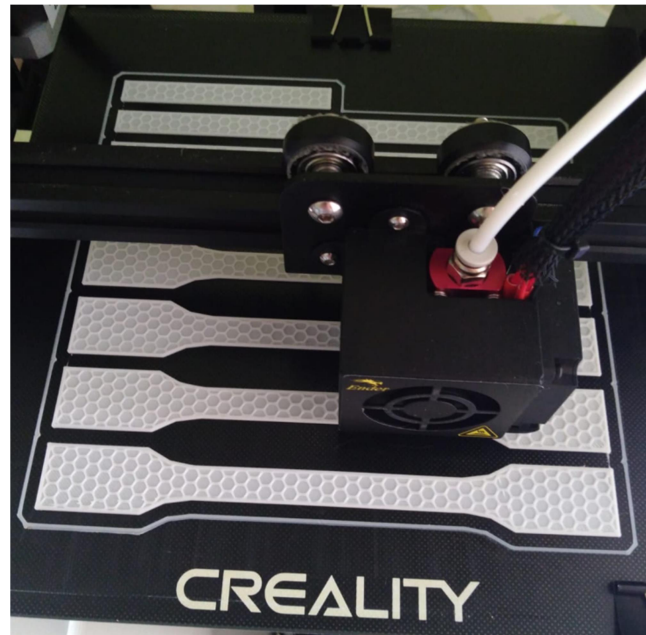


Figura 34 Exemple d'impressió d'un lot de provetes.

4.2.1.1. Problemes durant la impressió

D'entre totes les impressions n'hi ha hagut algunes que s'han hagut de repetir degut a diferents problemes amb algunes parts de la impressora.

El primer problema va sorgir quan una peça del motor de l'extrusor va deixar de funcionar correctament i feia que aquest es saltés passos i no imprimís correctament, fet que va fer que les capes no s'adherissin correctament entre elles com es mostra en la imatge a continuació on es mostra una proveta que es va separar en tres.



Figura 35 Proveta trencada per un error d'impressió.

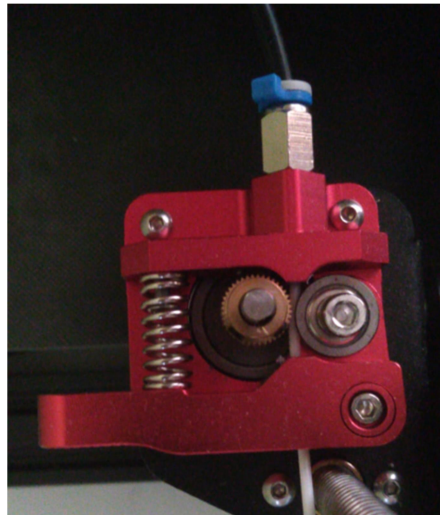


Figura 36 Recanvi de la peça de l'extrusor que va fallar.

Un altre problema que va sorgir va ser en impressions de llarga durada a temperatures altes, 220°C, es van embossar tant la boquilla com el tub d'alimentació, fet que va fer que hagués de repetir diverses provetes, ja que vaig trigar en veure que aquest era el problema.



Figura 37 Extrusor i tub d'alimentament obstruïts.



Figura 38 Provetes impreses amb la boquilla taponada.

4.2.2. Proves/testos/assajos

Una volta es tenen impreses totes les provetes es procedeix a realitzar els assajos a flexió i tracció. Per poder fer-los m'he desplaçat al laboratori d'Eurecat ja que era allí d'on disposaven de les màquines adequades. Ambdós tests han estat realitzats a una velocitat de 5mm/min.

4.2.2.1. Assajos a flexió

Els assajos a flexió han estat realitzats amb una màquina MultiTest 1-d per controlar la velocitat de l'assaig i la força exercida ha estat mesurada amb un dinamòmetre Mecmesin AFG 1000N. També s'han utilitzat suports i la punta de l'element de carrega impressos amb 3D.

El desenvolupament d'aquest assaig és bastant senzill, es fa baixar controladament el dinamòmetre fins que entra en contacte amb la proveta, un cop ens trobem en aquesta situació comencem la pressa de dades mitjançant un software i es fa descendre el dinamòmetre a 5mm/min fins que la proveta es trenca.



Figura 39 Assaig a flexió amb MultiTest 1-d i Mecmesin AFG 1000N

4.2.2.2. Assajos a tracció

Per als assajos a tracció com la força necessària per rompre les provetes era superior als límits dels aparells anteriors s'han realitzat amb la HOYTOM HM-20-D.

Els assajos a tracció també són bastant senzills de realitzar, primer es col·loquen les mordaces a la distància adequada i s'introdueixen les provetes, a continuació s'inicia l'assaig a una velocitat de 5mm/min i també s'inicia la presa de dades amb el software HOYWIN, l'assaig acaba quan la peça es trenca.



Figura 40 Proveta trencada al finalitzar l'assaig a tracció.



Figura 41 Imatge de la HOYTOM HM-20-D.

5. Resultats

Per a l'obtenció dels resultats s'han calculat les tensions màximes i els mòduls d'elasticitat i flexió a partir de les forces obtingudes amb els assajos, un cop es tenen aquestes dades s'ha fet la mitja dels resultats de les 5 provetes de cada combinació i aquestes després s'han introduït al Minitab 17 per obtenir resultats estadístics sobre la influència de cada paràmetre en els resultats finals.

5.1. Resultats Tracció

Per als assajos a tracció s'obté informació sobre la tensió màxima i el mòdul d'elasticitat, aquestes són les dades més fiables que s'obtenen a partir dels resultats dels assajos, ja que el límit elàstic no es pot obtenir amb claredat a partir del gràfic.

Taula 4 Resultats per als assajos de tracció

Nº experiment	Tensió màxima tracció (Mpa)	Mòdul elasticitat (Mpa)
1	21,6978	1318,66
2	27,7168	1541,38
3	30,8880	1738,71
4	21,9790	1266,08
5	28,6210	1558,22
6	22,2517	1468,58
7	25,8037	1467,98
8	30,1504	1561,60
9	27,8872	1452,34
10	31,6820	1764,37
11	30,2020	1715,46
12	34,4288	1846,50
13	27,6500	1572,36
14	35,4808	1842,54
15	31,9932	1629,28
16	32,5242	1745,22
17	26,4794	1382,02
18	35,7026	1713,80

Dels assajos a tracció les provetes que han obtingut un millor resultat a tracció han estat la 14 i la 18, els paràmetres d'aquestes provetes es mostren a continuació.

Taula 5 Provetes amb millors resultats per a tensió màxima

Nº experiment	A	B	C	D	E	F	Tensió màxima
14	2	0,2	1,2	75	40	210	35,4808
18	2	0,3	1,6	50	40	210	35,7026

En canvi els mòduls més grans els han obtingut la 12 i 14.

Taula 6 Provetes amb millors resultats per al mòdul d'elasticitat

Nº experiment	A	B	C	D	E	F	Mòdul d'elasticitat
12	2	0,1	1,6	50	60	200	1846,50
14	2	0,2	1,2	75	40	210	1842,54

Comparant aquest resultats amb les dades que trobem a la fitxa tècnica es pot veure que les tensions màximes que s'han obtingut es troben uns 25MPa per sota de la que diu el fabricant i el mòdul d'elasticitat es la meitat del que posa a la fitxa tècnica.

5.2. Resultats Flexió

Dels assajos a flexió s'obtenen resultats sobre la tensió màxima a flexió i el mòdul de flexió, igual que als assajos a tracció aquestes dades són les més fiables obtingudes a partir dels resultats obtinguts.

Taula 7 Resultats per als assajos a flexió

Nº experiment	Tensio maxima flexió (Mpa)	Mòdul flexió (Mpa)
1	54,6972	1848,62
2	55,3093	1880,48
3	67,4577	2050,68
4	50,6494	1598,70
5	57,7570	1871,02
6	53,2384	1602,22
7	57,8384	1752,22
8	64,1824	2010,80
9	63,5706	2047,52
10	70,0664	2434,16
11	67,1478	2421,82
12	69,1718	2400,02
13	59,1450	2013,98
14	72,0902	2439,80
15	69,7602	2420,50
16	66,7476	2284,14
17	62,2992	2181,52
18	72,3728	2496,96

Igual que en els assajos a tracció, les provetes que millors resultats han obtingut són la 14 i 18, i en aquest cas tant a tracció com a flexió.

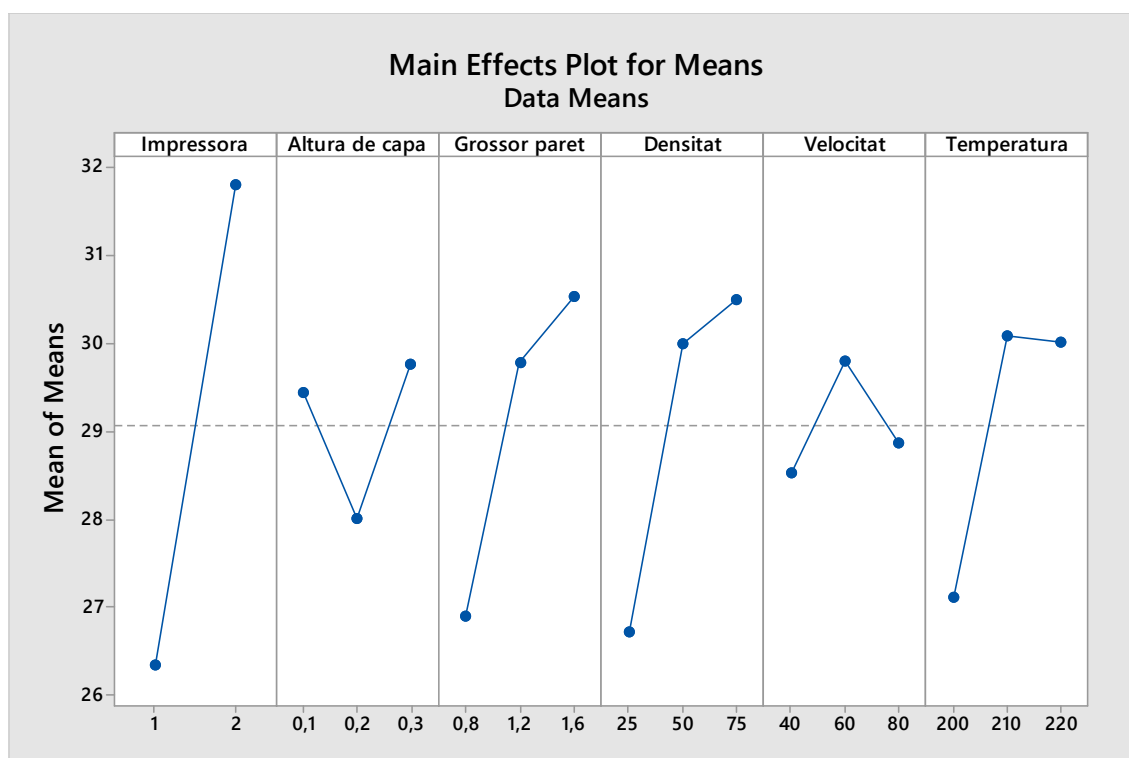
Taula 8 Provetes amb millor resultat per tensió màxima i mòdul de flexió

Nº experiment	A	B	C	D	E	F	Tensió màxima	Mòdul flexió
14	2	0,2	1,2	75	40	210	72,0902	2439,80
18	2	0,3	1,6	50	40	210	72,3728	2496,96

Els resultats obtinguts a flexió són més semblants als proporcionats per la fitxa tècnica, però segueixen sent més baixos, en el cas de tensió màxima a flexió hi ha 11MPa de diferencia i per al mòdul de flexió hi ha 1.3Gpa de diferencia.

5.3. Tensió màxima a tracció

En els gràfics que es mostren a continuació es pot observar la influència dels diferents paràmetres sobre els resultats, en aquest com major sigui el pendent entre els valors d'aquest major influència tindran sobre els resultats.



Gràfic 1 Gràfic de la mitja dels resultats de la tensió màxima a tracció

En aquest gràfic es pot veure com afecta cada paràmetre a la tensió màxima a tracció, podem observar clarament que l'ús d'una impressora professional millora notablement els resultats. En quant a l'altura de capa els valors 0.1 i 0.3 obtenen uns resultats similars en contra de 0.2mm que hi ha un clar descens d'aproximadament 2MPa.

El grossor de les parets fa que augmenti la resistència a tracció a mesura que es va augmentant, tenint un gran augment entre 0.8 i 1.2, i segueix augmentant però més subtilment a 1.6mm. Entre els tres valors hi ha un augment de 3.64 MPa. La corba de la densitat té una forma similar a la del grossor de paret, tenint un clar augment entre 25% i 50% d'emplenament i segueix augmentant fins el 75% on s'ha augmentat la resistència 3.79MPa respecte el 25%.

Els millors valors de la velocitat d'impressió s'obtenen a 60mm/s i després tenen uns valors similars a 40mm/s i 80mm/s. I finalment la temperatura d'impressió experimenta un clar augment de la resistència entre els 200° i 210° amb un augment de gairebé 3MPa, i en augmentar la temperatura a 220° hi ha un lleuger descens de la tensió màxima.

D'entre tots els paràmetres el que més influència té sobre els resultats és l'ús d'una impressora professional, i en ordre descendent d'influència estan la densitat d'emplenament, on els millors resultats s'han obtingut al 75%, el grossor de paret, amb els millors resultats a 1.6mm de grossor, la temperatura d'impressió, amb 210°C com a temperatura òptima i finalment l'altura de capa i velocitat d'impressió, amb 0.3mm i 60mm/s com a dades òptimes. Aquest paràmetres són els que estadísticament obtindrien la màxima resistència a tracció.

Taula 9 Valors que maximitzen els resultats de la tensió màxima a tracció

	Impressora	Altura capa	Grossor paret	Densitat	Velocitat	Temperatura
Òptim	2	0.3	1.6	75	60	210

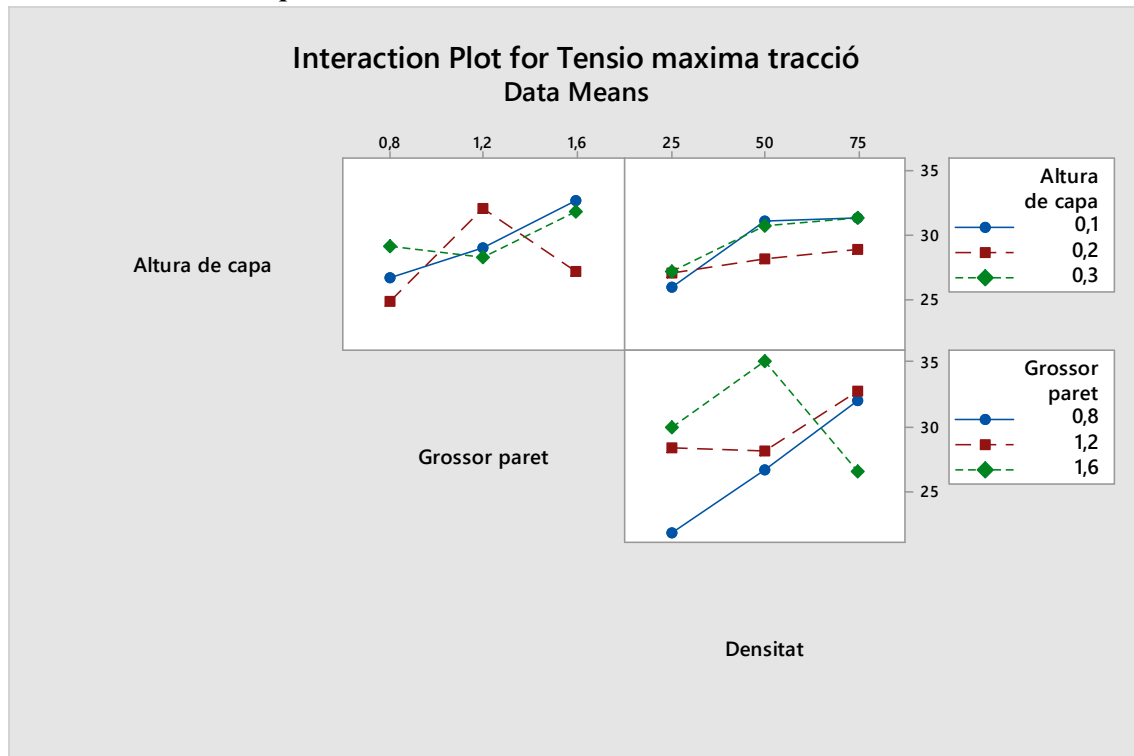
Per tal de determinar la significança de cada paràmetre amb el programa Minitab s'ha obtingut el p-value per a cada uns dels paràmetres, es pot considerar un p-value inferior a 0.1 acceptable per assegurar que un paràmetre és significatiu sobre els resultat.

Taula 10 p-vàlues per als diferents paràmetres

Paràmetres	p-value
Impressora	0.004
Altura de cama (mm)	0.428
Grossor paret (mm)	0.100
Densitat (%)	0.082
Velocitat (mm/s)	0.615
Temperatura d'impressió (°C)	0.138

A partir del p-value es veu els paràmetres que són significatius són; l'elecció d'una impressora professional, la densitat d'emplenament i el grossor de les parets.

5.3.1. Interacció entre paràmetres



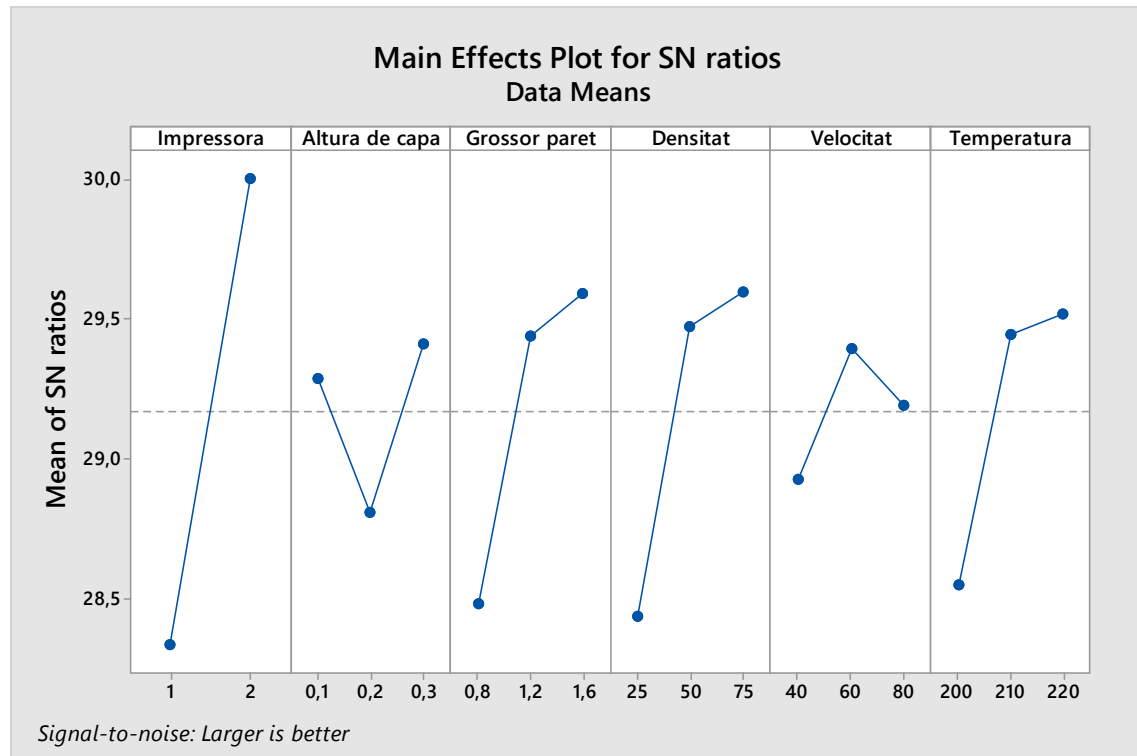
Gràfic 2 Gràfic d'interacció entre els paràmetres que afecten la proveta directament

Els gràfics d'interacció entre paràmetres mostren si n'hi ha d'algun tipus entre dos d'aquests, per fer aquest gràfic s'ha decidit només tenir en compte els paràmetres que afecten directament l'objecte imprès. Per entendre millor aquest gràfic quan entre dos valors no hi ha interacció les línies d'aquest són paral·leles, si hi ha poca es creuen suaument i si n'hi ha es pot veure clarament l'encreuament.

En aquest cas no hi ha interaccions molt clares a part de l'altura de capa 0.2mm i el grossor de paret i el grossor de paret 1.6mm amb la densitat d'emplenament.

Aquest gràfic només té en compte les combinacions que s'han donat en les diferents provetes pel disseny d'experiments de Taguchi.

5.3.2. Relació Sound-Noise

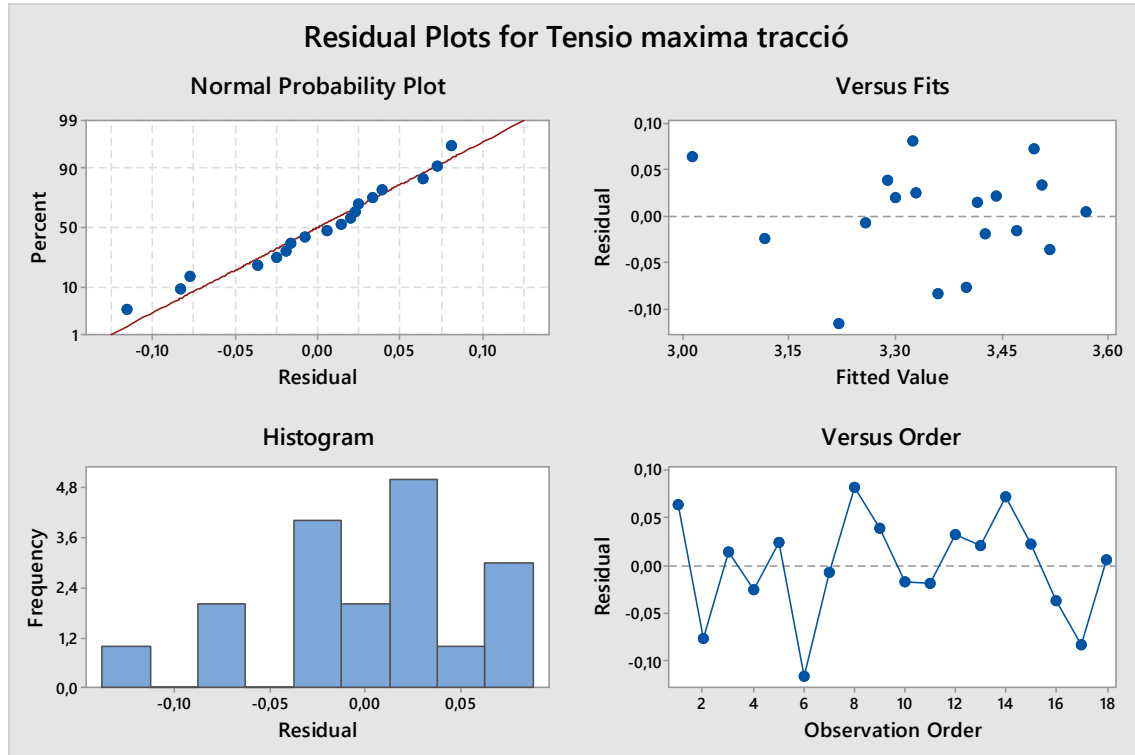


Gràfic 3 Gràfic S/N per tensió màxima a tracció

Els gràfics sobre la relació S/N determina la robustesa que ofereix cada paràmetre sobre els resultats, és a dir els paràmetres que redueixen la variabilitat sobre els resultats. El que es busca amb aquest gràfics és reduir als mínims la variabilitat produïda pels factors que no es poden controlar, que són els factors de soroll.

Per a la tensió màxima suportada a tracció els paràmetres més favorables per reduir la variabilitat dels resultats són l'ús d'una impressora professional i després amb menys importància trobaríem la densitat d'emplenament, el grossor de paret i la temperatura.

5.3.3. Residus



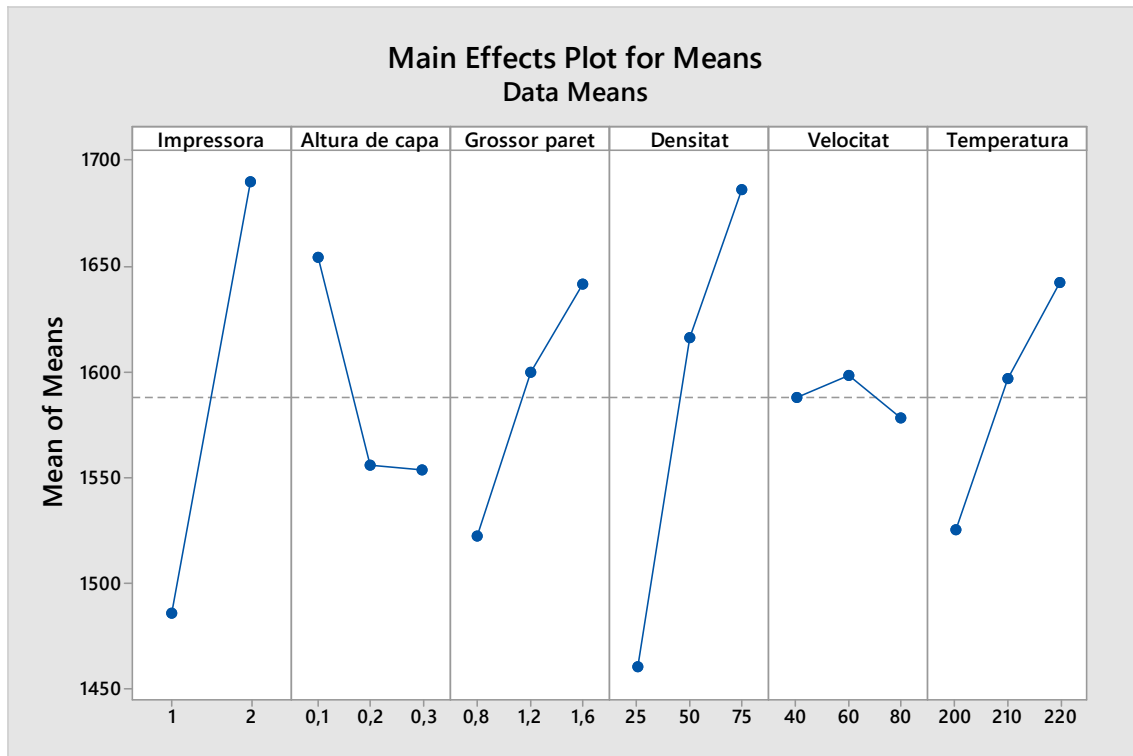
Gràfic 4 Gràfic de residus per tensió màxima a tracció

Els gràfics de residus ens serveixen per determinar si el model utilitzat és l'adequat per als experiments i si compleixen amb els suposats del anàlisi, és a dir, ens informa de la fiabilitat dels resultats obtinguts.

La gràfica de la probabilitat normal ha de seguir aproximadament una línia recta, com en aquest cas això es cert. podem confirmar que els resultats segueixen una distribució normal. En el cas de l'histograma també es segueix aproximadament una distribució normal. I per als altres dos gràfics els punts presenten les distribucions adequades.

Tot això fa indicar que els resultats sobre la tensió màxima a tracció són fiables.

5.4. Mòdul d'elasticitat



Gràfic 5 Gràfica dels valors mitjans del mòdul d'elasticitat

En el gràfic de mitges per al mòdul d'elasticitat s'observa certa semblança amb el de tensió màxima en alguns paràmetres però amb resultats diferents.

Igual que amb la tensió màxima l'ús d'una impressora professional mostra un clar increment en el mòdul d'elasticitat, en l'altura de capa s'observa un descens del mòdul a mesura que s'augmenta el valor d'aquesta, havent un clar descens des de 0.1mm a 0.2 mm de 100MPa i segueix disminuint però molt poc als 0.3mm.

El grossor de paret fa augmentar el mòdul a mesura que augmenta tenint un valor mínim de 1522 MPa amb un grossor de 0.8mm fins 1642 MPa a grossors de 1.6mm, tenint un valor intermig en 1.2mm. En aquest cas la densitat d'emplenament es el paràmetre que més influeix sobre els resultats, fent augmentar el mòdul a mesura que s'incrementa la densitat. Es passa de 1461 MPa a una densitat de 25% a 1617 MPa al 50% d'emplenament fins a valors de 1687 MPa per a una densitat d'emplenament del 75%.

Per als resultats del mòdul d'elasticitat la velocitat d'impressió és el que menys influeix, amb uns resultats similars per cadascun dels valors d'aquest paràmetre amb un màxim en 60mm/s. Finalment la temperatura d'impressió també fa augmentar el mòdul d'elasticitat a mesura que s'incrementa obtenint uns resultats de 1525 MPa a 200°C fins a 1642 MPa a 220°C.

La influència dels paràmetres en el mòdul d'elasticitat de major a menor són la densitat d'emplenament amb un valor òptim del 75%, seguidament hi ha l'elecció d'una impressora professional, a continuació el grossor de paret amb un màxim per 1.6mm, la temperatura d'impressió obté uns millors resultats a 220°C, per a l'altura de capa els millors resultats s'obtenen per 0.1mm i finalment el paràmetre menys influent es la velocitat d'impressió, que en aquest cas el màxim s'obté a 60mm/s. La combinació d'aquest valors seran els que maximitzaran el mòdul d'elasticitat.

Taula 11 Valors que maximitzen els resultats del mòdul d'elasticitat

	Impressora	Altura capa	Grossor paret	Densitat	Velocitat	Temperatura
Òptim	2	0.1	1.6	75	60	220

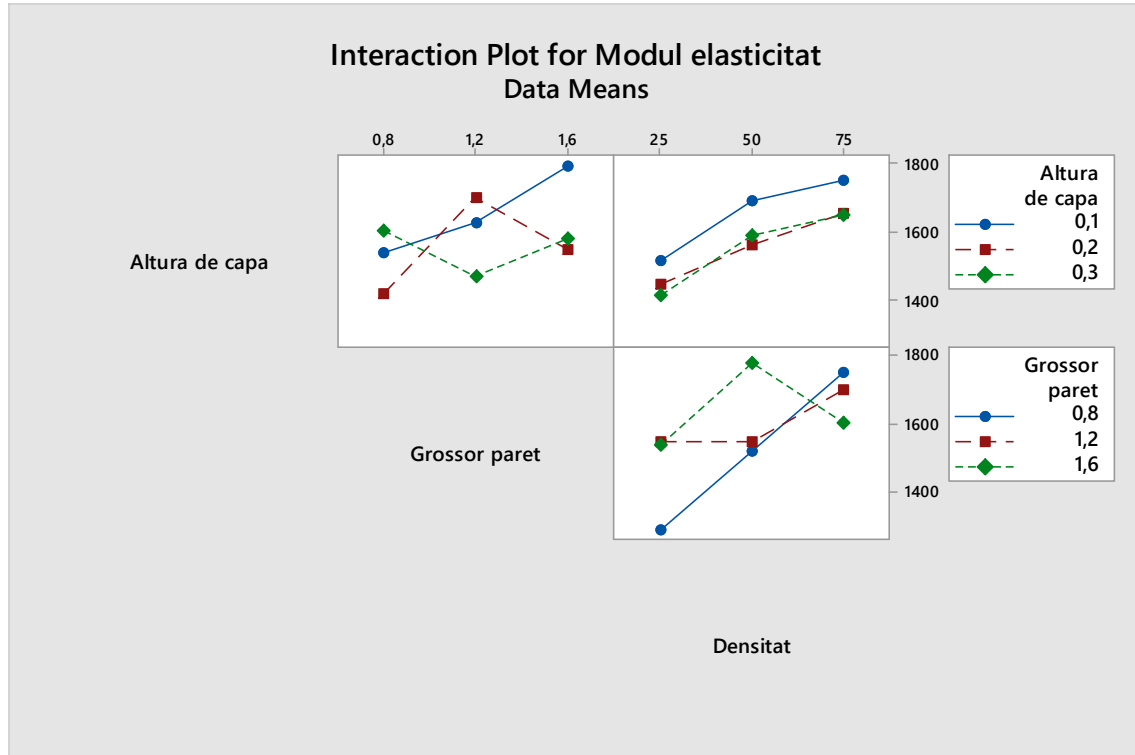
Per tal de determinar la significança de cada paràmetre amb el programa Minitab s'ha obtingut el p-value per a cada uns dels paràmetres, es pot considerar un p-value inferior a 0.1 acceptable per assegurar que un paràmetre és significatiu sobre els resultat.

Taula 12 p-value per als diferents paràmetres

Paràmetres	p-value
Impressora	0.002
Altura de cama (mm)	0.127
Grossor paret (mm)	0.080
Densitat (%)	0.006
Velocitat (mm/s)	0.943
Temperatura d'impressió (°C)	0.089

Basant-nos en el p-value de cada paràmetre podem considerar significatius sobre els resultats l'elecció d'una bona impressora, la densitat d'emplenament, el grossor de paret i la temperatura d'impressió.

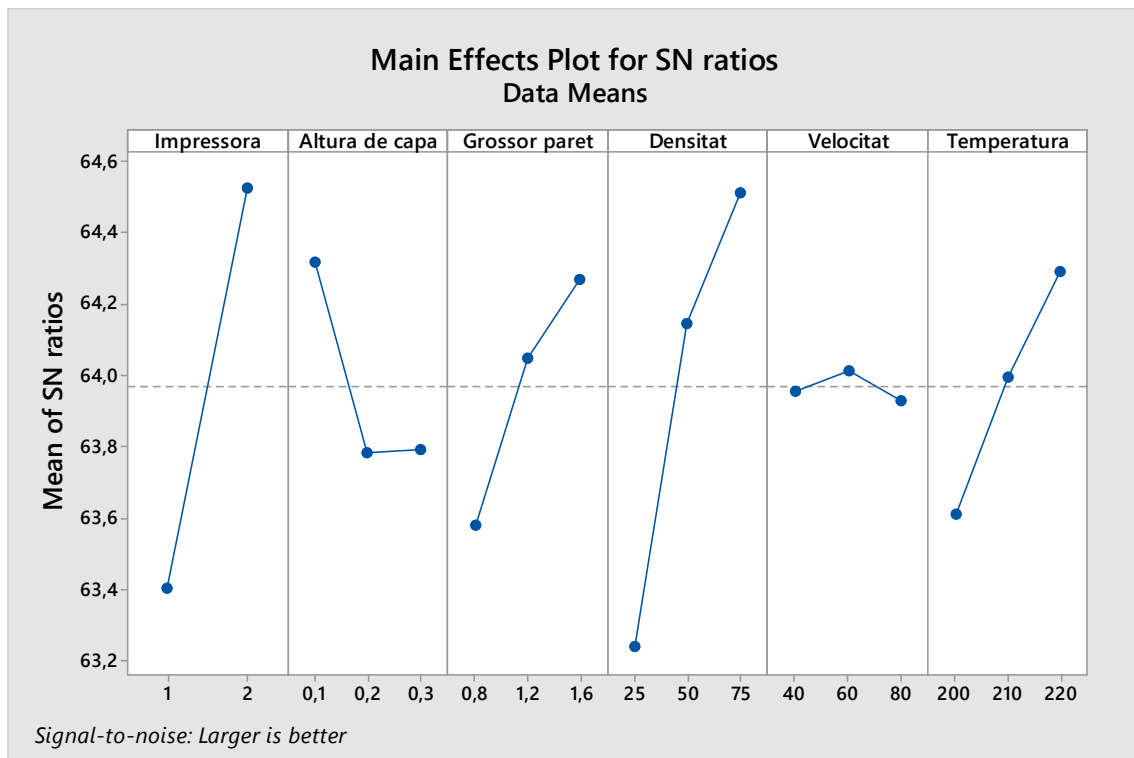
5.4.1. Gràfic d'interacció



Gràfic 6 Gràfic d'interacció de paràmetres

Per al mòdul d'elasticitat segueix sense haver interacció entre la densitat d'emplenament i l'altura de capa. En canvi segueix havent interacció entre l'altura de capa i el grossor de les parets, i també entre la densitat d'emplenament i el grossor de les parets.

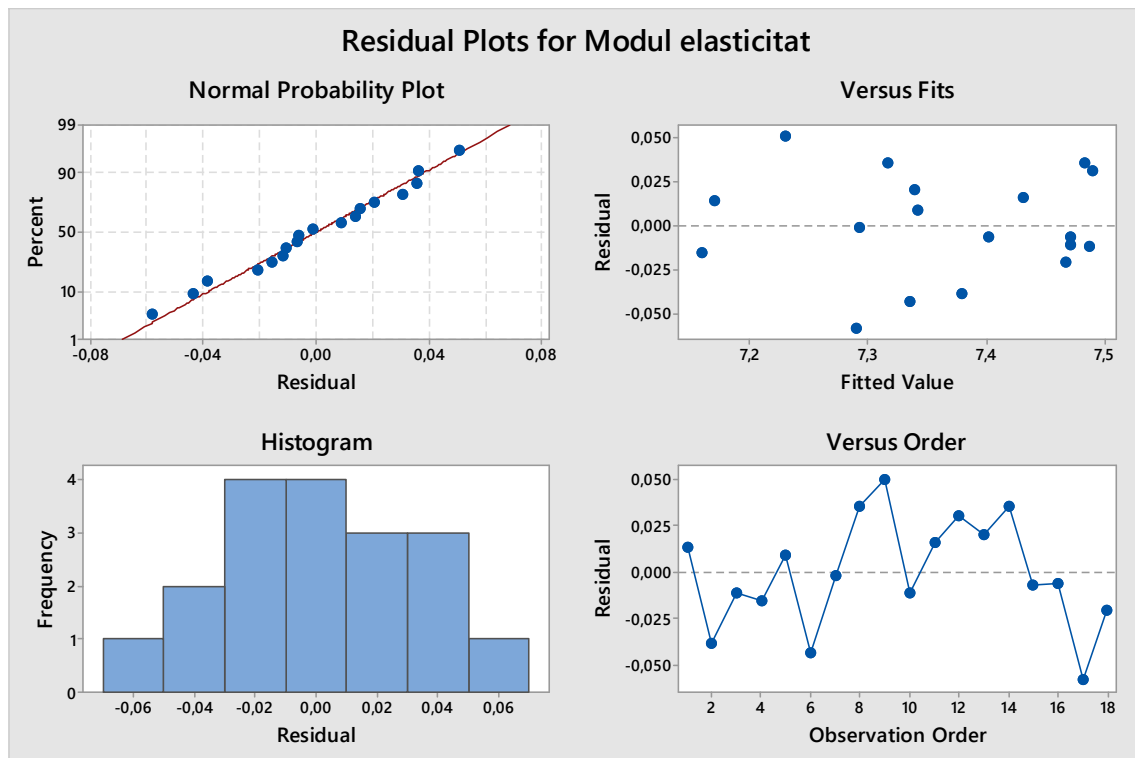
5.4.2. S/N



Gràfic 7 Gràfic S/N per mòdul d'elasticitat

Per mòdul d'elasticitat els paràmetres més favorables per reduir la variabilitat dels resultats són l'ús d'una impressora professional i la densitat d'emplenament, la resta de paràmetres presenten més variabilitat sobre els resultats.

5.4.3. Residus

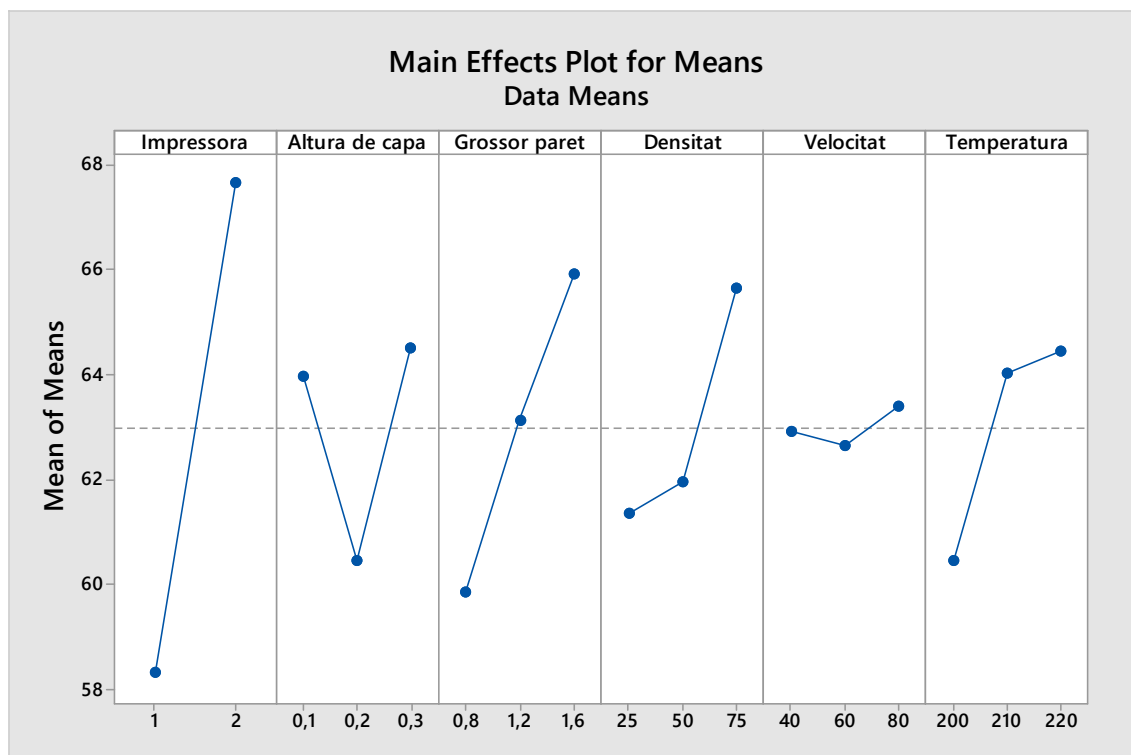


Gràfic 8 Gràfic de residus per al mòdul d'elasticitat

La gràfica de la probabilitat normal ha de seguir aproximadament una línia recta, com en aquest cas això és cert podem confirmar que els resultats segueixen una distribució normal. En el cas de l'histograma en aquest també segueix el d'una distribució normal. I per als altres dos gràfics els punts presents les distribucions adequades.

Tot això fa indicar que els resultats sobre el mòdul d'elasticitat són fiables

5.5. Tensió màxima a flexió



Gràfic 9 Gràfic dels valors mitjans per a la tensió màxima a flexió

Els resultats obtinguts sobre la tensió màxima suportada a flexió segueix també el patró dels resultats a tracció on els paràmetres que més influeixen sobre el resultat són l'elecció d'una bona impressora, el grossor de paret i la densitat d'emplenament.

Analitzant el gràfic es veu clarament que el paràmetre que més afectarà als resultats es l'ús d'una bona impressora en comptes d'una de convencional amb un increment de gairebé 10 MPa entre les dues opcions. A continuació observem que els resultats per a les diferents altures de capa són pràcticament similars per als valors de 0.1mm i 0.3 mm, que és la que té millors resultats, i amb pitjors resultats hi ha les altures de capa de 0.2mm.

En quan al grossor de paret s'observa una tendència al alça a mesura que augmenta aquest valor, passant de 59.86 MPa per a 0.8mm fins a 65.93 MPa per a 1.6mm. Pel que fa a la densitat hi ha un lleuger augment de la tensió màxima entre el 25% i 50% d'emplenament, però entre el 50% i el 75% s'observa un augment considerable amb un augment de 4MPa entre els dos valors.

La velocitat d'impressió, igual que per als resultats de la tensió màxima a tracció i el mòdul d'elasticitat, és el valor que menys influència té sobre els resultats amb una diferència entre els resultats de 0.75 MPa entre 60mm/s, que es el valor que obté pitjors resultats, i 80mm/s que és el que n'obté millors. Finalment en la temperatura d'impressió s'observa un clar augment de la tensió màxima entre els 200°C i els 210°C, on la tensió augmenta des de 60.46MPa fins a 64.01MPa, i segueix augmentant de forma més lleugera fins als 64.45 MPa a 220°C.

Els paràmetres més influents sobre la tensió màxima suportada a flexió són de major a menor l'ús d'una impressora professional, el grossor de paret, amb el punt màxim a 1.6mm, la densitat d'emplenament, obtenint uns millors resultats al 75%, a continuació hi ha l'altura de capa on els millors resultats s'obtenen a 0.3mm d'altura, i finalment trobem la temperatura d'impressió a 220°C i la velocitat d'impressió amb 80mm/s com a millor velocitat.

Taula 13 Valors que maximitzen els resultats a la tensió màxima a flexió

	Impressora	Altura capa	Grossor paret	Densitat	Velocitat	Temperatura
Òptim	2	0.3	1.6	75	80	220

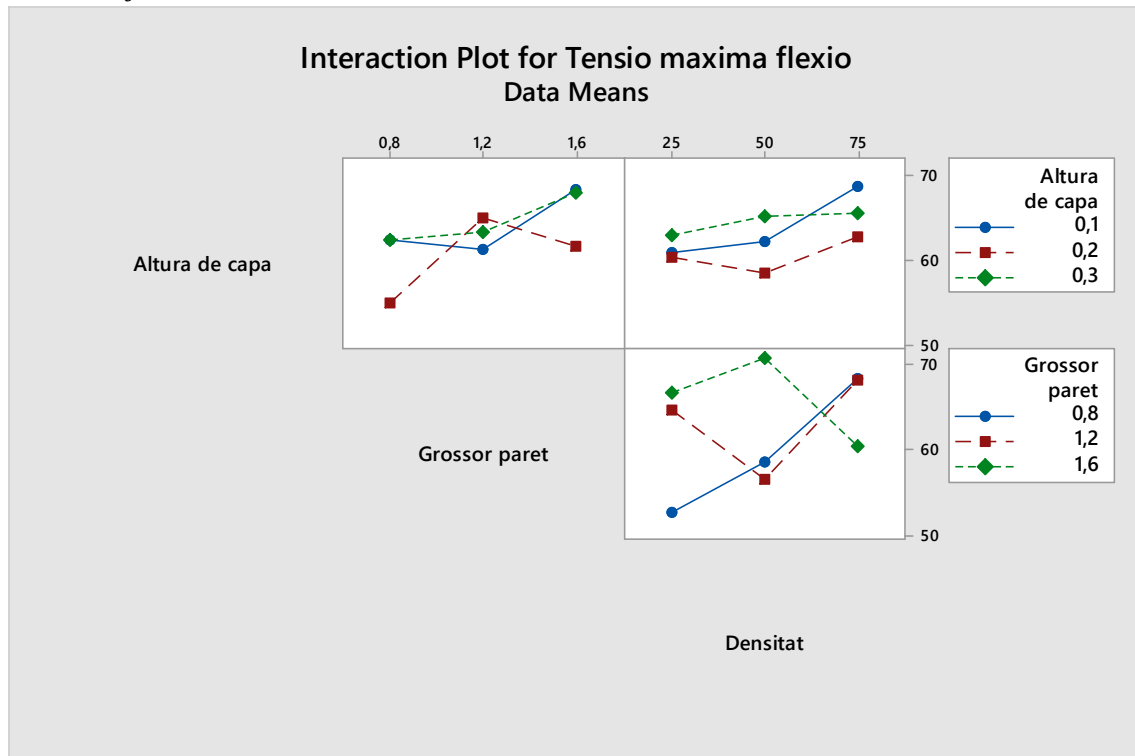
Per tal de determinar la significança de cada paràmetre amb el programa Minitab s'ha obtingut el p-value per a cada uns dels paràmetres, es pot considerar un p-value inferior a 0.1 acceptable per assegurar que un paràmetre és significatiu sobre els resultat.

Taula 14 p-values per als diferents paràmetres

Paràmetres	p-value
Impressora	0.004
Altura de cama (mm)	0.382
Grossor paret (mm)	0.130
Densitat (%)	0.253
Velocitat (mm/s)	0.983
Temperatura d'impressió (°C)	0.256

Basant-nos en el p-value de cada paràmetre podem considerar com a significatiu sobre els resultats l'elecció d'una bona impressora, en aquest cas només es pot considerar significatiu aquest paràmetre ja que com es pot veure en el gràfic de mitges la resta de valors no hi ha grans diferències entre els màxims i mínims per diferents valors de cada paràmetre.

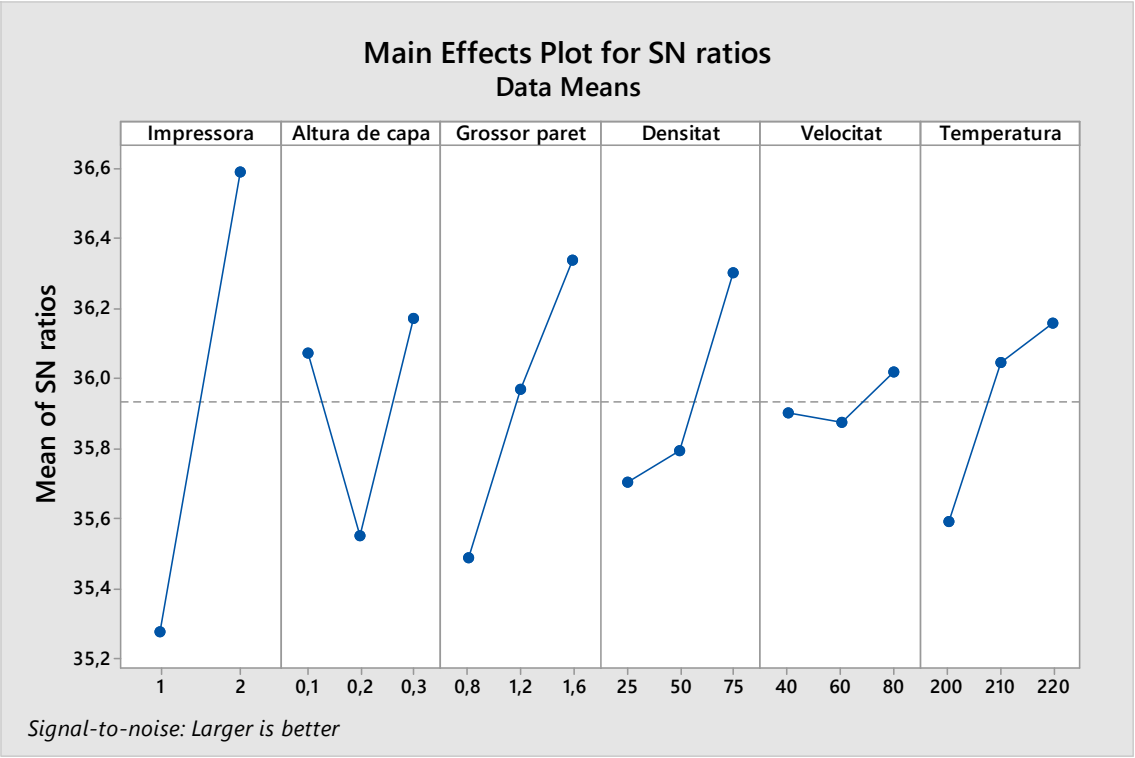
5.5.1. Gràfic d'interacció



Gràfic 10 Gràfic d'interacció de paràmetres

Per a la tensió màxima a flexió la interacció entre paràmetres només s'observa entre la densitat d'emplenament i el grossor de les parets. Amb les altres interaccions es veu que són més subtils i pràcticament inexistent.

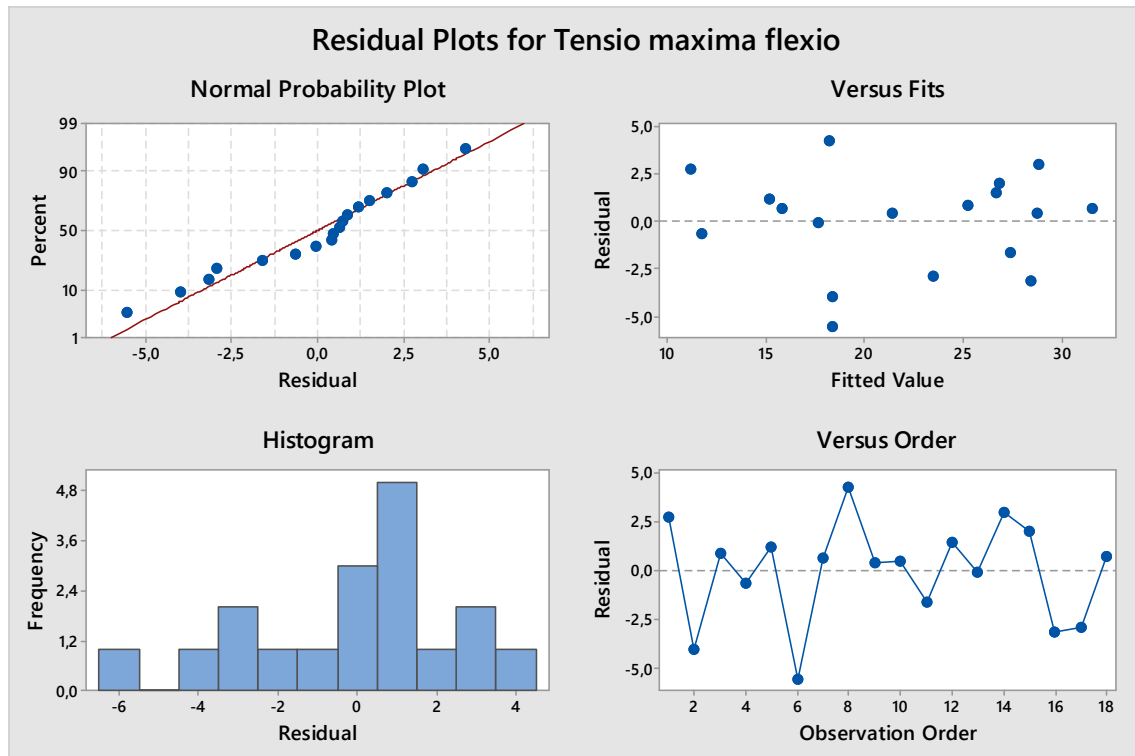
5.5.2. SN



Gràfic 11Gràfic S/N per tensió màxima a flexió

Per a la tensió màxima a flexió els paràmetres més favorables per reduir la variabilitat dels resultats és l'ús d'una impressora professional, la resta de paràmetres presenten més variabilitat sobre els resultats.

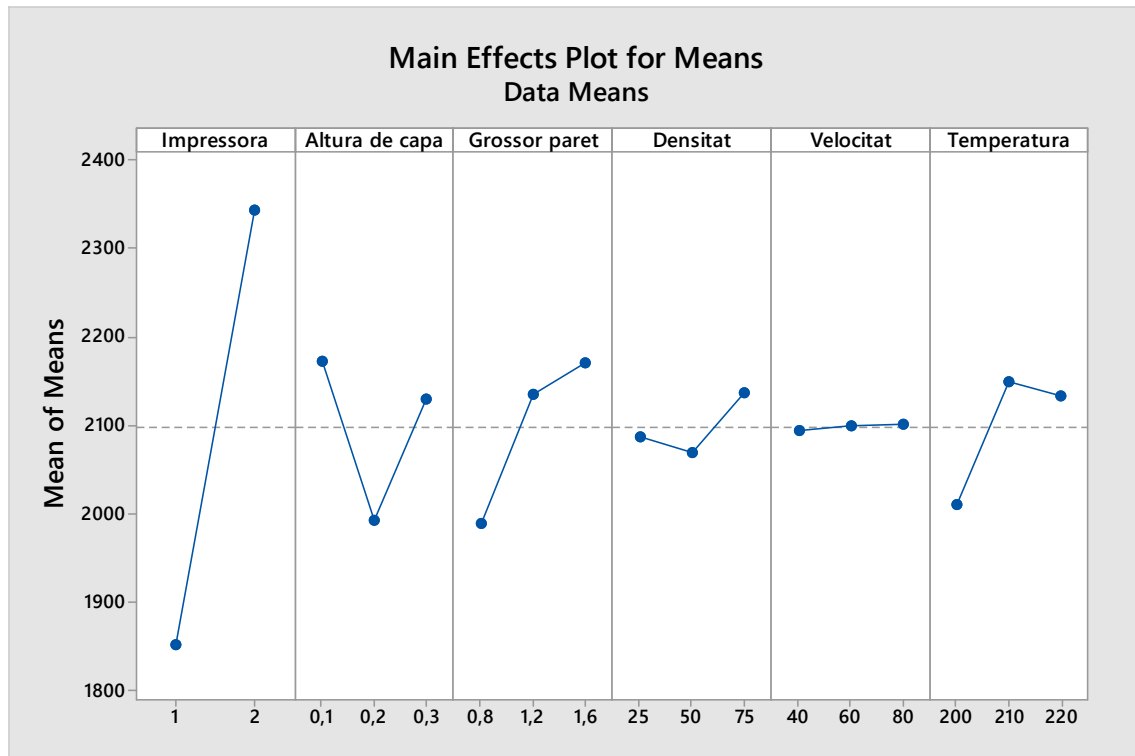
5.5.3. Residus



Gràfic 12 Gràfic de residus per a la tensió màxima a flexió

En aquest la gràfica de la probabilitat normal segueix una línia recte però es veuen alguns punts que es desvien d'aquesta, això lligat amb que l'histograma tampoc segueix una distribució normal porta que els resultats no siguin del tot fiables, tot i que amb els altres dos gràfics si que es segueix la distribució esperada.

5.6. Mòdul flexió



Gràfic 13 Gràfica dels valors mitjans del mòdul de flexió

De tots els resultats obtinguts, el mòdul de flexió és el que té menys variació entre els valors dels diferents paràmetres, on l'únic paràmetre que mostra una gran diferència entre els seus valors és l'ús d'una impressora professional.

Com s'acaba de comentar en quant a l'elecció d'impressores hi ha un clar increment del mòdul de flexió entre una impressora convencional i una de professional, el mòdul de flexió ha passat de 1851MPa a 2344MPa. L'altura de capa és un dels altres paràmetres que també experimenta més variació entre els seus valors, tot i que per a les altures de 0.1mm i 0.3mm s'obtenen uns valors similars amb el màxim a 0.1mm amb un mòdul de flexió de 2173MPa, per a 0.2mm s'obté un mòdul de 1991MPa.

El grossor de les parets de les provetes té un efecte positiu sobre el mòdul de flexió a mesura que augmenta el seu valor, es passa de 1989MPa per a 0.8mm a 2170MPa a 1.6mm. Pel que fa la densitat d'emplenament la variació és relativament baixa amb una variació de 68MPa entre el mínim i el màxim que el trobem al 75% d'emplenament amb un mòdul de flexió de 2137MPa.

La velocitat d'impressió és un paràmetre que pràcticament no té efecte sobre els resultats del mòdul de flexió amb una variació de 6MPa entre els seus valors. Finalment la temperatura d'impressió fa augmentar el mòdul de flexió entre els 200°C i els 210°C fins a 2150MPa i després hi ha un lleuger descens als 220°C on hi ha un mòdul de 2133MPa.

Pel que fa al mòdul de flexió els paràmetres que més influència tenen sobre el resultat de major a menor són l'ús d'una impressora professional, com en la majoria dels casos, després trobem l'altura de capa amb un valor òptim de 0.1mm, seguim amb el grossor de paret amb millors resultats per 1.6mm, després hi ha la temperatura d'impressió amb valors màxims per 210°C, la millor densitat d'emplenament la trobem al 75% i finalment per a la velocitat d'impressió els millors resultats s'han obtingut en 80mm/s.

Taula 15 Valors que maximitzen els resultats del mòdul de flexió

	Impressora	Altura capa	Grossor paret	Densitat	Velocitat	Temperatura
Òptim	2	0.1	1.6	75	80	210

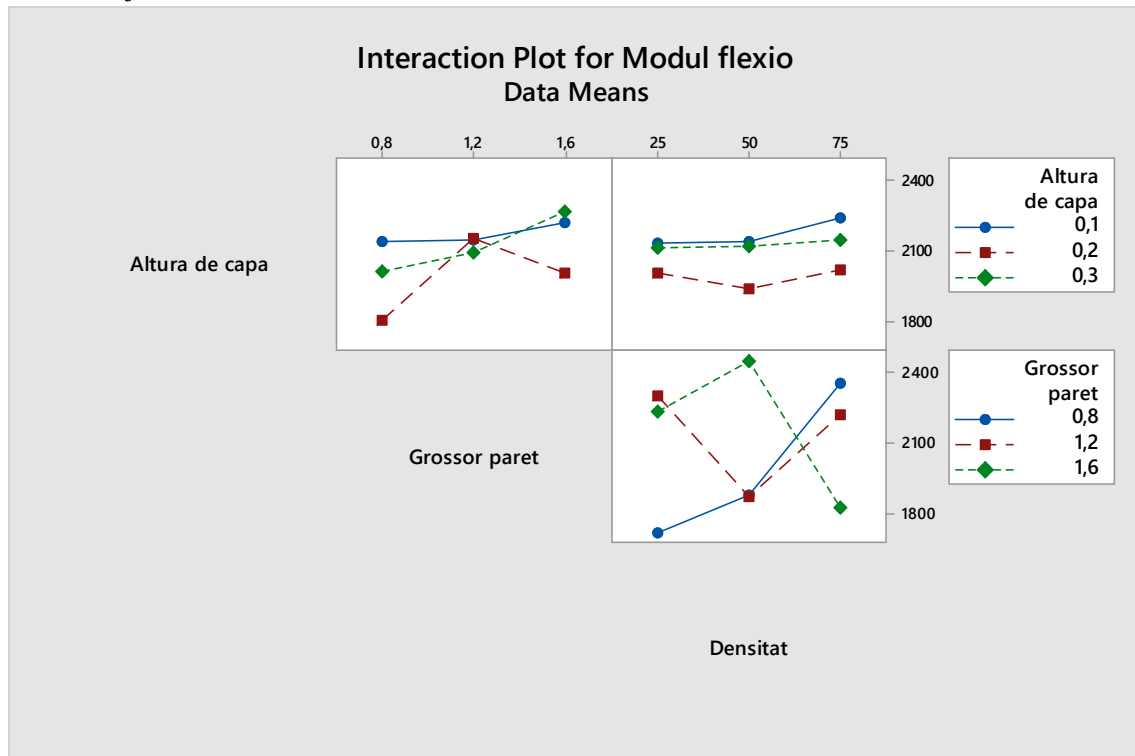
Per tal de determinar la significança de cada paràmetre amb el programa Minitab s'ha obtingut el p-value per a cada uns dels paràmetres, es pot considerar un p-value inferior a 0.1 acceptable per assegurar que un paràmetre és significatiu sobre els resultat.

Taula 16 p-values per als diferents paràmetres

Paràmetres	p-value
Impressora	0.000
Altura de cama (mm)	0.205
Grossor paret (mm)	0.131
Densitat (%)	0.669
Velocitat (mm/s)	0.863
Temperatura d'impressió (°C)	0.174

Basant-nos en el p-value de cada paràmetre podem considerar com a significatiu sobre els resultats l'elecció d'una bona impressora, en aquest cas només es pot considerar significatiu aquest paràmetre ja que com es pot veure en el gràfic de mitges la resta de valors no hi ha grans diferències entre els màxims i mínims per diferents valors de cada paràmetre.

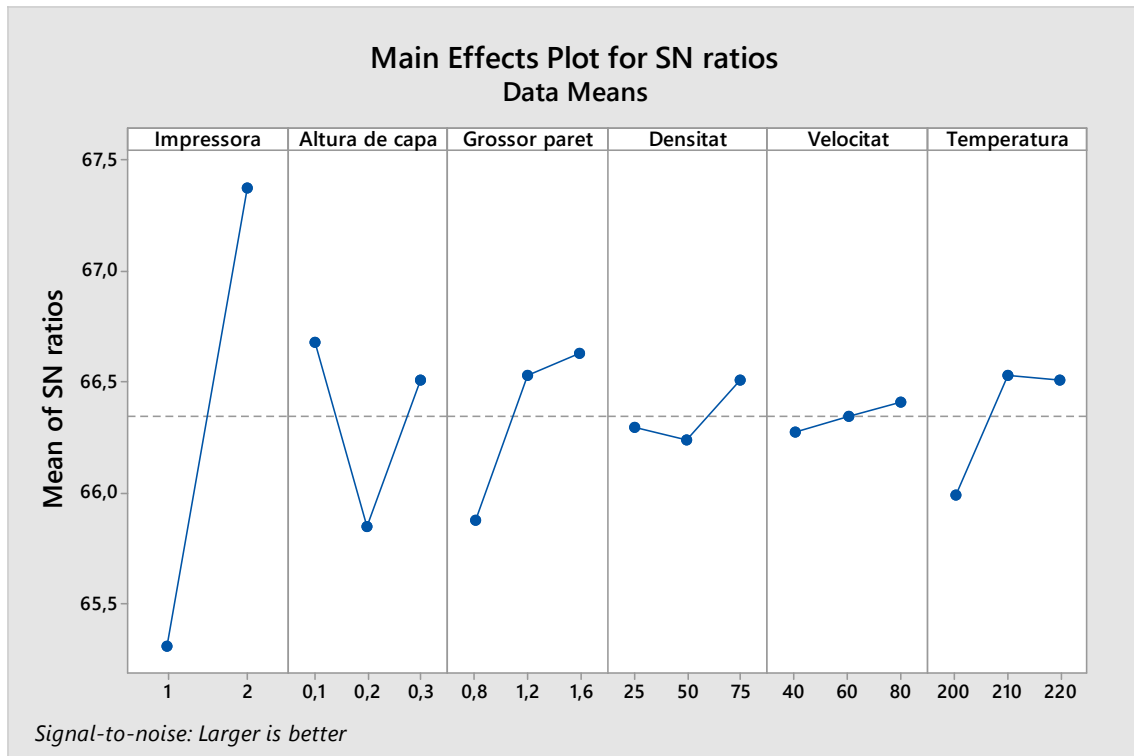
5.6.1. Gràfic d'interaccions



Gràfic 14 Gràfic d'interacció de paràmetres

Per al mòdul de flexió la gràfica d'interaccions és molt semblant a la de la tensió màxima suportada a flexió, pràcticament no hi ha interacció entre l'altura de capa i el grossor de les parets i la densitat d'emplenament però si que s'observa una clara interacció entre la densitat i el grossor de paret.

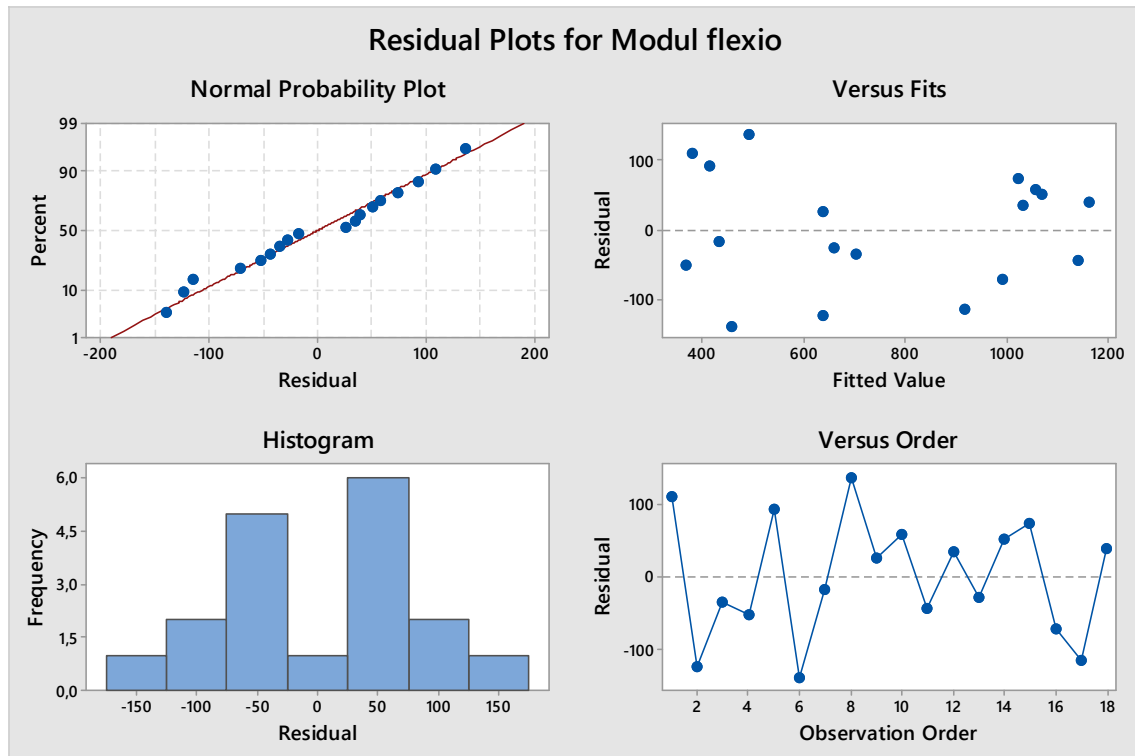
5.5.2. SN



Gràfic 15 Gràfic S/N pel mòdul de flexió

Per mòdul de flexió l'únic paràmetre que aporta robustesa al model és l'ús d'una impressora professional, la resta de paràmetres presenten una major variabilitat sobre els resultats.

5.5.3 Residus



Gràfic 16 Gràfic de residus per al mòdul de flexió

La gràfica de la probabilitat normal segueix una línia recta amb pocs punts fora d'aquesta per tant podem confirmar que els resultats segueixen una distribució normal. En el cas de l'histograma en aquest cas també segueix el d'una distribució normal. I per als altres dos gràfics els punts presents les distribucions adequades.

Tot això fa indicar que els resultats sobre el mòdul de flexió són fiables

5.6. Costos

Per al càlcul dels costos d'aquest projecte se'n consideraran tres; els cost de l'electricitat, el cost del material i el cost dels assajos. La resta de costos, com el de les impressores i treball humà no es tindran en compte. El cost del projecte serà la suma de tots tres.

$$\text{Cost total} = \text{Cost electricitat} + \text{Cost material} + \text{Cost assajos}$$

Per calcular el cost de l'electricitat es calcularà multiplicant la potència de la impressora pel preu de l'electricitat i el temps d'impressió.

$$\text{Cost electricitat} = \text{Potencia impressora} * \text{Preu electricitat} * \text{Temps d'impressió}$$

El cost del material es calcularà multiplicant el preu per kilogram de material i el material utilitzat.

$$\text{Cost material} = \text{Preu material} * \text{Material utilitzat}$$

I en quant als costos del assajos es de 100€ per 5 assajos d'un tipus més 5€ per assaig addicional.

$$\text{Cost assajos} = (100 + 5 * 13) * 2 = 330\text{€}$$

A la següent taula es mostren els costos per cada lot de provetes.

	Material (g)	Temps	Cost elèctric (€)	Cost material (€)
1	46,03	9:39	0,37025892	1,081705
2	55,24	9:06	0,34915608	1,29814
3	62,84	9:34	0,36706152	1,47674
4	46,58	3:33	0,13620924	1,09463
5	55,89	3:58	0,15219624	1,313415
6	63,48	7:00	0,2685816	1,49178
7	55,52	3:57	0,15155676	1,30472
8	62,58	3:37	0,13876716	1,47063
9	52,97	2:12	0,08441136	1,244795
10	64,68	6:01	0,11542614	1,51998
11	52,32	10:49	0,20751126	1,22952
12	61,47	8:13	0,15763182	1,444545
13	57,57	3:03	0,05851242	1,352895
14	65,91	6:47	0,13013418	1,548885
15	55,18	4:12	0,08057448	1,29673
16	64,46	3:08	0,06011112	1,51481
17	53,63	2:12	0,04220568	1,260305
18	61,65	4:49	0,09240486	1,448775

El cost total elèctric són 2.96€ i el cost material total són 24.39€, això sumat als 330€ dels assajos deixa un pressupost total de 357.35€

6. Discussió dels resultats

Un cop es tenen els resultats es poden veure certes similituds entre aquest en referent a alguns dels paràmetres d'estudi i la seva influència sobre les tensions màximes suportades i els mòduls d'elasticitat i flexió.

Clarament després d'analitzar els diferents resultats el paràmetre que més els ha afectat, sent el paràmetre més influent en tres dels quatre casos, ha estat la diferència entre una impressora convencional i un altra de professional, essent també l'únic factor significatiu, basant-nos amb els p-values, per tots els resultats.

Aquestes diferències segurament són degudes, a part de la diferència de qualitat entre els dos productes i de les diferències entre la qualitat de les seves impressions, a la meua inexperiència amb la impressió 3D, on també el muntatge de la Creality Ender 3 el vaig fer jo, tenint alguns problemes per aconseguir anivellar correctament l'eix Z i també amb el correcte anivellament de la base d'impressió. Tot i que en quant a nivell estètic no s'observava diferència entre les provetes de les dues impressores en els apartats tècnics si que hi ha una clara diferència a favor de la impressora professional.

Tenint en compte això es pot concloure que per tal d'obtenir uns productes que requereixen certes prestacions mecàniques un dels factors més importants a tenir en compte és el correcte ús d'una impressora professional.

Dels paràmetres d'estudi n'hi ha tres que influeixen directament a les provetes, aquests són l'altura de capa, el grossor de les parets i la densitat d'emplenament.

El primer fa referència al total de capes hi ha per proveta, que és el mateix que dir el nombre d'unions entre capes, a més capes, més unions entre capes, també cal dir que és un dels paràmetres que menys influència té sobre els resultats, sent només influent en el mòdul a flexió però sense arribar a ser significatiu. Tenint en compte això i els resultats obtinguts en els assajos a tracció i flexió s'observa que per a les tensions màximes suportades en els dos assajos les provetes que millors resultats han obtingut han estat les que major altura de capa tenien, en canvi per als resultats del mòdul en ambdós casos els millors resultats han estat obtinguts per les que menys altura de capa tenien.

Aquest fet pot donar a entendre que per suportar tensions com major l'altura de capa millor i en quant a resistència a menor altura millor, però mirant més detingudament els resultats es pot veure que en totes els casos hi ha una davallada dels resultats entre les altures 0.1mm i 0.2mm i en alguns casos després al passar als 0.3mm augmenta, aquest fet fa que no hi hagi una relació clara entre si al augmentar o reduir les altures de capa milloren o no alguns resultats. La conclusió que si que es pot treure és que per 0.1mm i 0.3mm els resultats presenten poca variació i en la majoria els pitjors resultats han estat obtinguts en altures de 0.2mm.

Els altres dos paràmetres, el grossor de paret i la densitat d'emplenament, fan referència a la densitat total de la proveta i també a la quantitat de material utilitzar. Aquest paràmetres si que han estat influents en tots els casos, i la densitat ha estat significativa en els resultats a tracció i el grossor de paret en el mòdul d'elasticitat.

Analitzant els resultats obtinguts s'observen certes diferències entre els obtinguts a tracció i flexió. Per als resultats a tracció, tant en els de la tensió màxima suportada com en el mòdul d'elasticitat es pot veure un augment notable d'aquest en passar dels 0.8mm de paret i 25%

d'emplenament a 1.2mm de paret i 50% d'emplenament. Amb cadascun d'aquest canvis individualment la tensió màxima ha augmentat sobre els 4MPa, amb un creixement pràcticament paral·lel, pel que fa al mòdul d'elasticitat l'augment del grossor de paret en aquest tram no té tant d'efecte com l'augment de la densitat que amb aquest augment del 25% hi ha una variació de gairebé 200MPa.

En el següent tram els resultats no han experimentat un augment tant notable com en l'anterior tot i que han seguit creixent. La tensió màxima ha continuat augmentat paral·lelament però en aquest cas sobre 1MPa. Per al mòdul d'elasticitat aquest canvi ha estat més notable que per a la tensió.

Tot això indica que la tendència a l'alça de la tensió màxima a tracció i el mòdul d'elasticitat va lligada amb la densitat total de la proveta donant a entendre que els valors màxims d'aquests s'obtidrien per una proveta completament sòlida.

Per als resultats a flexió la tendència segueix sent la mateixa, en quant més densa la proveta millors resultats, tot i que en aquest cas el canvi més notable es produeix en passar de 1.2mm a 1.6mm i del 50% al 75%.

Els dos paràmetres que queden són referents al procés d'impressió, tenim la velocitat d'impressió i la temperatura d'impressió. En comparació amb la resta de paràmetres són els que en conjunt de tots els resultats són els menys influents, especialment la velocitat d'impressió, ja que la temperatura d'impressió ha estat significativa en els resultats del mòdul d'elasticitat.

Pel que fa a la velocitat d'impressió, ha estat el paràmetre menys influent en tots els casos, tenint molt poca variació entre els diferents valors i pràcticament no afectant sobre els resultats finals. Tot i això, posats a buscar els millors valors per cada paràmetre, en aquest cas al tractar-se de geometries simples les velocitats una mica més elevades són les que han donat millors resultats.

Per a la temperatura d'impressió, observant els resultats queda clar que imprimir a 200°C és en tots casos el que pitjor resultats ha donat amb bastanta diferència. D'altra banda per a temperatura entre 210°C i 220°C la millora dels resultats ha estat notable comparat amb els obtinguts a 200°C, i la diferència entre aquest dos valors es pràcticament escassa en la majoria dels casos.

Tenint en compte que el fabricant recomana unes temperatures d'impressió entre 200°C i 220°C, vistos els resultats, es podria afirmar que els millors resultats s'obtenen en el rang superior de temperatures, tot i que imprimir a 220°C pot arribar a conduir a problemes d'impressió si aquestes són d'una durada considerable.

El resum de tots els resultats serien els paràmetres que maximitzarien cada valor, però després d'analitzar-los més detingudament es pot concloure que, òbviament, l'ús d'una impressora professional té un clar efecte sobre les propietats mecàniques de les provetes, que les màximes prestacions s'obtidrien en provetes sòlides, i que tot i que en alguns casos la millor temperatura d'impressió sigui 220°C, el millor seria imprimir a 210°C per tal d'evitar problemes futurs.

En quant al pressupost del projecte, el principal cost han estat els assajos amb bastanta diferencia respecte la resta de costos, aquest han estat valorats en uns 330€. Seguidament trobem el cost del material amb 24.39€ i finalment el cost elèctric amb 2.96€.

7. Conclusions

Després d'analitzar els resultats obtinguts sobre la tensió màxima a tracció, el mòdul d'elasticitat, la tensió màxima a flexió i el mòdul de flexió s'ha arribat a les següents conclusions.

Els valors òptims de cada paràmetre no són sempre els mateixos per a les diferents propietats mecàniques, ni tan sols per a les de tracció juntes ni per les de flexió. Tot i que si que en alguns casos hi ha relació.

El paràmetre més influent en la majoria dels casos ha estat l'ús d'una impressora professional per a la impressió de les provetes.

Els següents paràmetres més influents sobre els resultats han estat el grossor de paret i la densitat d'emplenament, aquest dos van relacionats directament amb la densitat total de la proveta i la solidesa d'aquesta, i els resultats obtinguts porten a pensar que seguint la tendència que han tingut aquests valors per provetes sòlides encara s'obtidrien millors resultats. Es a dir la resistència a tracció i flexió va lligada amb la densitat total de les provetes.

La variació obtinguda en els resultats sobre l'altura de capa utilitzada no permet obtenir unes conclusions clares sobre si és millor un major nombre de capes o un major grossor d'aquestes.

Els paràmetres menys influents sobre els resultats són la velocitat d'impressió i la temperatura d'impressió, tot i que aquesta última convé situar-la en 210°C on s'han obtingut bons resultats i no ha donat problemes com es el cas de en 220°C.

Els resultats obtinguts presenten una gran diferencia en comparació amb la fitxa tècnica del material. La tensió màxima a tracció ha donat resultats de 25MPa per amunt per sota del valor del fabricant. El mòdul d'elasticitat ha estat de la meitat per avall. La tensió màxima a flexió s'ha quedat en 11MPa per amunt per sota del valor esperat i el mòdul de flexió te una diferencia de 1.3GPa per amunt.

A part de les conclusions anteriors aquests són els valors òptims que s'han obtingut per a cada propietat mecànica estudiada:

Tensió màxima a tracció

	Impressora	Altura capa	Grossor paret	Densitat	Velocitat	Temperatura
Òptim	2	0.3	1.6	75	60	210

Mòdul d'elasticitat

	Impressora	Altura capa	Grossor paret	Densitat	Velocitat	Temperatura
Òptim	2	0.1	1.6	75	80	210

Tensió màxima a flexió

	Impressora	Altura capa	Grossor paret	Densitat	Velocitat	Temperatura
Òptim	2	0.3	1.6	75	80	220

Mòdul de flexió

	Impressora	Altura capa	Grossor paret	Densitat	Velocitat	Temperatura
Òptim	2	0.1	1.6	75	80	210

Més enllà d'aquest estudi s'haurien de comprovar aquests resultats, ja que aquestes combinacions no s'han donat en cap cas dels 18 plantejats. S'haurien de repetir els assajos amb aquestes noves combinacions per tal de validar els resultats obtinguts.

8. Bibliografía

1. 3D Neworld. (2015, 6 marzo). *Qué es la Impresión 3D*. <https://3dneworld.com/que-es-la-impresion-3d/>
2. *3D printing | manufacturing*. (2020). Encyclopedia Britannica. <https://www.britannica.com/technology/3D-printing>
3. *3D printing process*. (2020). . <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:3d-printing-a-2014-horizonwatching-trend-summary-report-9-638.jpg>
- A. (2020a, septiembre 16). *Stereolithography / SLA 3D Printing – Simply Explained*. All3DP. <https://all3dp.com/2/stereolithography-3d-printing-simply-explained/>
4. *A Guide to 3D Printing*. (2020). MegaDepot.com. <https://megadepot.com/resource/a-guide-to-3d-printing>
5. Apoyo, R. (2015, 4 diciembre). *¿Cómo surgió el mundo de la impresión 3D? Impresión 3D antes de RepRap*. DIWO. <http://diwo.bq.com/impresion-3d-historia/>
6. Aragón, R. (2020, 14 febrero). *10 tipos de impresiones 3D que han revolucionado la medicina*. tuexperto.com. <https://www.tuexperto.com/2020/02/14/10-tipos-de-impresiones-3d-que-han-revolucionado-la-medicina/>
7. *ASTM D790-15e2 Flexural Properties of Plastics Materials*; (2020). . <https://www.instron.es/testing-solutions/by-test-type/flexure/the-definitive-guide-to-astm-d790>
8. *ASTM D882 - 18 Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting*. (2020). <https://www.astm.org>. <https://www.astm.org/Standards/D882>
9. *ASTM D882-12 Tensile Testing of Thin Plastic Sheeting*; (2020). . <https://www.instron.com.ar/es-ar/testing-solutions/by-test-type/tension/astm-d882>
10. Baca Lopez, D. M., & Ahmad, R. (2020). Tensile Mechanical Behaviour of Multi-Polymer Sandwich Structures via Fused Deposition Modelling. *Polymers*, 12(3), 651. <https://doi.org/10.3390/polym12030651>
11. Banjanin, B., Vladic, G., Pál, M., Balos, S., Dramicanin, M., Rackov, M., & Knezevic, I. (2018). Consistency analysis of mechanical properties of elements produced by FDM additive manufacturing technology. *Matéria (Rio de Janeiro)*, 23(4), 1-15. <https://doi.org/10.1590/s1517-707620180004.0584>
12. BBC News Mundo. (2019, 16 abril). *El primer minicorazón vivo impreso en 3D y hecho con tejido y vasos humanos (y por qué lo ven como «la medicina del futuro»)*. <https://www.bbc.com/mundo/noticias-47937217>
13. Briceño-Martínez, B. J., Llanes Cedeño, E. A., Rocha-Hoyos, J. C., Chamba, E., Cuasapud, D., & Cárdenaz-Yáñez, A. (2019). Tecnologías de impresión 3D: evaluaciones de FDM y Polyjet en la fabricación de autopartes de automóviles. *Enfoque UTE*, 10(3), 13-29. <https://doi.org/10.29019/enfoque.v10n3.414>

14. Cantrell, J. T., Rohde, S., Damiani, D., Gurnani, R., DiSandro, L., Anton, J., Young, A., Jerez, A., Steinbach, D., Kroese, C., & Ifju, P. G. (2017). Experimental characterization of the mechanical properties of 3D-printed ABS and polycarbonate parts. *Rapid Prototyping Journal*, 23(4), 811-824. <https://doi.org/10.1108/rpj-03-2016-0042>
15. Chacón, J. M., Caminero, M. A., García-Plaza, E., & Núñez, P. J. (2017). Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection. *Materials & Design*, 124, 143-157. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.03.065>
16. colaboradores de Wikipedia. (2020, 15 mayo). *Estereolitografía*. Wikipedia, la enciclopedia libre. <https://es.wikipedia.org/wiki/Estereolitograf%C3%ADa>
17. *Desarrollo de la metodolog'ia de Taguchi*. (2020). . https://www.ugr.es/~mruiz/temas/Tema_9.pdf
18. *Diseño de experimentos: Taguchi y tradicional*. (2020). . https://www.researchgate.net/publication/283328255_Disen%C3%B3_de_experimentos_Taguchi_y_tradicional
19. *Diseños de Taguchi - Minitab*. (2020). (C) Minitab, LLC. All rights Reserved. 2019. <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/doe/supporting-topics/taguchi-designs/taguchi-designs/>
20. *El diseño experimental y los métodos de Taguchi: Conceptos y aplicaciones en la industria farmacéutica*. (2020). . <https://www.econstor.eu/bitstream/10419/84374/1/392634856.pdf>
21. *Estudio: Efectos del porcentaje de relleno, espesor de la capa y patrón de relleno en la impresión 3D*. (2020). . <https://www.3dworks.cl/post/estudio-efectos-del-porcentaje-de-relleno-espesor-de-la-capa-y-patr%C3%B3n-de-relleno-en-la-impresi%C3%B3n-3d>
22. *FDM o SLA: Guía comparativa de impresoras 3D de 2020*. (2020). Formlabs. <https://formlabs.com/es/blog/fdm-sla-comparacion-tipos-impresoras-3d/>
23. Ferrero, M. R. (2015, 17 julio). *Aplicaciones de la impresión 3D (III) - Textil, Joyería y Arte*. Impresión 3D Prototipado | 3D Printing Prototyping | Dima 3D. <http://www.dima3d.com/en/aplicaciones-de-la-impresion-3d-iii-textil-joyeria-y-arte/>
24. Galeja, M., Hejna, A., Kosmela, P., & Kulawik, A. (2020). Static and Dynamic Mechanical Properties of 3D Printed ABS as a Function of Raster Angle. *Materials*, 13(2), 297. <https://doi.org/10.3390/ma13020297>
25. Galina, D. (2020, 19 octubre). *Caracterización de las propiedades mecánicas de los cuerpos de prueba ABS confeccionados con diferentes parámetros de extrusión vía impresión 3D*. . <https://www.semanticscholar.org/paper/Caracterizaci%C3%B3n-de-las-propiedades-mec%C3%A1nicas-de-los-Galina-Garcia/c20eb78b74567808e99913ef60c5a775555df435?p2df>
26. Gregurić, L. (2019, 20 marzo). *What Is Material Jetting? – 3D Printing Simply Explained*. All3DP. <https://all3dp.com/2/what-is-material-jetting-3d-printing-simply-explained/>
27. H. (2015a, marzo 12). *Materiales de impresión 3D (I): PLA (ácido poliláctico) | HXX*. . <http://hxx.es/2015/03/12/materiales-de-impresion-3d-i-pla-acido-polilactico/>

28. *How to design parts for SLA 3D printing.* (2020a). 3D Hubs. <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/how-design-parts-sla-3d-printing/>
29. *How to design parts for SLA 3D printing.* (2020b). 3D Hubs. <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/how-design-parts-sla-3d-printing/>
30. *Implementación de la impresión 3D en la educación ¿una necesidad?* (2020). . <https://www.3dnatives.com/es/impresion-3d-en-la-educacion-290820182/>
31. *ISO 527-2: Tensile Testing for Plastics;* (2020). . <https://www.instron.us/testing-solutions/by-standard/iso/iso-527-2>
32. Joyee, E. B., Lu, L., & Pan, Y. (2019). Analysis of mechanical behavior of 3D printed heterogeneous particle-polymer composites. *Composites Part B: Engineering*, 173, 106840. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.05.051>
33. Kannan, S., & Ramamoorthy, M. (2020). Mechanical characterization and experimental modal analysis of 3D Printed ABS, PC and PC-ABS materials. *Materials Research Express*, 7(1), 015341. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab6a48>
34. L. (2015b, agosto 3). *Getting into....the 3D printing industry.* University of Leeds Careers Centre Blog. <https://leedsunicareers.wordpress.com/2015/08/03/getting-into-the-3d-printing-industry/>
35. L. (2015c, agosto 3). *Getting into....the 3D printing industry.* University of Leeds Careers Centre Blog. <https://leedsunicareers.wordpress.com/2015/08/03/getting-into-the-3d-printing-industry/>
36. Lanzotti, A., Grasso, M., Staiano, G., & Martorelli, M. (2015). The impact of process parameters on mechanical properties of parts fabricated in PLA with an open-source 3-D printer. *Rapid Prototyping Journal*, 21(5), 604-617. <https://doi.org/10.1108/rpj-09-2014-0135>
37. Liu, C., Huang, N., Xu, F., Tong, J., Chen, Z., Gui, X., Fu, Y., & Lao, C. (2018). 3D Printing Technologies for Flexible Tactile Sensors toward Wearable Electronics and Electronic Skin. *Polymers*, 10(6), 629. <https://doi.org/10.3390/polym10060629>
38. M. (2020, 23 agosto). *Multitask Technology, Panamá.* Multitask Technology (Multitask, S.A.). <http://www.multitask.com.pa/filamento/>
39. M. (2020b, octubre 12). *[Free Guide] 2020 Guide to 3D Printing Materials.* MakerBot. <https://www.makerbot.com/stories/design/top-5-3d-printing-applications/>
40. MakerBot 3D Printing. (2020, 17 junio). *10 Advantages of 3D Printing.* MakerBot. <https://www.makerbot.com/stories/engineering/advantages-of-3d-printing/>
41. *Mesa Impresoras 3D | Impresora 3d, Impresora, Mesas.* (2020). Pinterest. <https://www.pinterest.es/pin/358528820332535102/>
42. P. (2020c, mayo 30). *Descubre las tecnologías de impresión 3D más importantes del 2020.* 3DWork. https://3dwork.io/tecnologias-de-impresion-3d/#Caracteristicas_principales

43. Phadke, M. S. (2012, 16 enero). *Introduction To Robust Design (Taguchi Method)*. iSixSigma. <https://www.isixsigma.com/methodology/robust-design-taguchi-method/introduction-robust-design-taguchi-method/>
44. *Pieza aeronáutica impresa en 3D de tres metros - Impresoras 3D*. (2018, 14 octubre). Imprimalia 3D. <http://imprimalia3d.com/noticias/2018/10/14/0010389/pieza-aeronutica-impresa-3d-tres-metros>
45. *Plastics — Determination of tensile properties —*. (2020). . <http://img52.chem17.com/1/20160527/635999409682810926936.pdf>
46. *Plastics- Determination of flexural properties*. (2020). . <http://img42.chem17.com/5/20120529/634738817689531250.pdf>
47. Raheem, Z. (2019, 29 enero). *Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics I*. https://www.researchgate.net/publication/330713593_Standard_Test_Method_for_Tensile_Properties_of_Plastics_1
48. Ruiz-Domínguez, G. A. (2020). *Estudio de Esfuerzo y Deformación de Piezas de Impresión 3D*. . <https://www.redalyc.org/jatsRepo/944/94459796005/html/index.html>
49. Sagias, V. D., Giannakopoulos, K. I., & Stergiou, C. (2018). Mechanical properties of 3D printed polymer specimens. *Procedia Structural Integrity*, 10, 85-90. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2018.09.013>
50. Sejzer, R. (2020). *El Método Taguchi, la Ingeniería Robusta y el Diseño de Experimentos*. . <http://ctcalidad.blogspot.com/2016/08/el-metodo-taguchi-la-ingenieria-robusta.html#:~:text=El%20M%C3%A9todo%20Taguchi%2C%20la%20Ingenier%C3%ADa%20Robusta%20y%20el%20Dise%C3%B1o%20de%20Experimentos,-Gen%27ichi%20Taguchi&text=El%20M%C3%A9todo%20Taguchi%2C%20en%20cambio,que%20no%20pueden%20ser%20controlados>
51. *Servicios prototipos rapidos impresion 3D - prototipado rápido ABS nylon*. (2017, 3 septiembre). Diseño Impresión 3D. <https://disenoimpresion3d.es/servicios/servicio-impresion-3d-online/servicios-prototipos-rapidos-impresion-3d-abs-nylon-prototipado-rapido/>
52. Somireddy, M., Singh, C. V., & Czekanski, A. (2020). Mechanical behaviour of 3D printed composite parts with short carbon fiber reinforcements. *Engineering Failure Analysis*, 107, 104232. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.104232>
53. *Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting*. (2020). . http://mahshahr.aut.ac.ir/lib/exe/fetch.php?media=labs:astm_d882.pdf
54. *Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials*. (2020). . http://mahshahr.aut.ac.ir/lib/exe/fetch.php?media=labs:astm_d790.pdf
55. *Stratasys: 3D Printing & Additive Manufacturing*. (2020). Stratasys. <https://www.stratasys.com/>
56. *STUDY OF THE INFLUENCE OF 3D PRINTING PARAMETERS ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF PLA*. (2020). researchgate. https://www.researchgate.net/publication/325786530_STUDY_OF_THE_INFLUENCE

_OF_3D_PRINTING_PARAMETERS_ON_THE_MECHANICAL_PROPERTIES_OF_PLA

57. T. (2014, 24 mayo). *Will 3D printing survive patents?* .
<https://traverseda.wordpress.com/2014/03/13/will-3d-printing-survive-patents/>
58. T., A. (2018, 1 marzo). *The 4 Most Popular Rapid Prototyping Technologies In Manufacturing Today*. Rapid Prototyping 3D Blog. <https://rapidprototyping3d.com/4-popular-rapid-prototyping-technologies-manufacturing/>
59. TechPats. (2017, 27 abril). *3D Printing | An Overview of 3D Printing Technologies*.
<https://www.techpats.com/3d-printing-technologies-overview/>
60. *The history of 3D printing*. (2020). Stratasys.
<https://www.stratasys.com/explore/article/3d-printing-history>
61. Valero, A. (2020). *El movimiento RepRap y el conocimiento libre*. DIWO.
<http://diwo.bq.com/el-movimiento-reprap-y-el-conocimiento-libre/>
62. *What is 3D printing?* (2020). Stratasys. <https://www.stratasys.com/explore/article/what-is-3d-printing>
63. Wikipedia contributors. (2020a, octubre 7). *Fused filament fabrication*. Wikipedia.
https://en.wikipedia.org/wiki/Fused_filament_fabrication#Process
64. Wikipedia contributors. (2020b, octubre 17). *Selective laser sintering*. Wikipedia.
https://en.wikipedia.org/wiki/Selective_laser_sintering

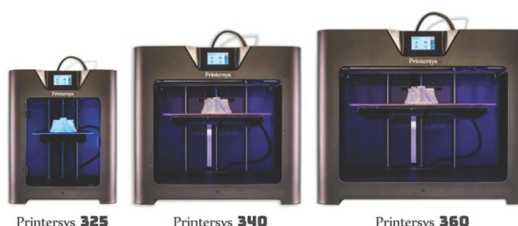
9. Annexos

9.1. Fixta tècnica Printersys 325

Printersys

Especificaciones técnicas de la Serie 3

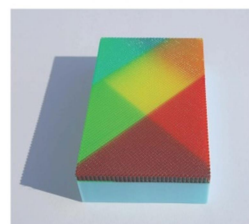
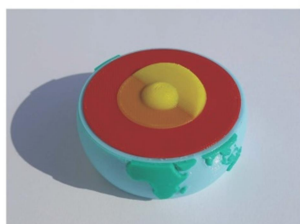
La gama de impresoras Serie 3 de Printersys son equipos de fabricación aditiva profesional para entornos industriales y/o oficina, concebidos para trabajar en ciclos 24/7 gracias a su sólida construcción y a la calidad de todos sus componentes.



Propiedades de impresión	Tecnología	FFF (Fused Filament Fabrication)		
	Transmisión	Core XY		
	Extrusor	1 extrusor directo con opción a multimaterial (Intercambiador de filamento con capacidad para 4 materiales/colores incluido material de soporte)		
	Temperatura de la boquilla	170 - 285°C		
	Diámetros de boquillas	0.25, 0.40 (incluida), 0.60, 0.80 mm		
	Volumen de impresión	Printersys 320 200 x 200 x 220 mm	Printersys 325 250 x 250 x 310 mm	Printersys 340 450 x 400 x 310 mm
	Diámetro del filamento	1.75 mm		
	Resolución de capa	Desde 60 micras		
	Resolución X/Y/Z	7.07 / 7.07 / 2.5 micras		
	Velocidad de movimiento	20 - 200 mm/s		
	Base de impresión	Temperatura 150 °C máx.		
	Alimentación / control de la base	230 V AC / Control PID de la temperatura		
	Ventilador de capa	Flujo de aire omnidireccional con abanico de 270°		
	Materiales soportados	PLA, ABS, PETG, PP, Flex, Nylon, POM, PC (todos los soportados por la extrusión directa)		
Usabilidad	Display	Pantalla táctil en color de 3.2 pulgadas		
	Conectividad	Impresión autónoma desde tarjeta SD en el frontal Cloud Printer System by Printersys; para impresión y monitoreo a través de internet con conexión a través de Wi-Fi o red		
	Función de Auto-Apagado	Sistema de apagado automático al finalizar la impresión		
	Base de impresión	Buildtak Flexplate		

Printersys

	Iluminación	LED's RGB para indicar diferentes etapas del proceso de impresión		
	Detección de filamento	Función de detección de filamento (pausa la impresora)		
	Cerramiento	Puerta desmontable (OPCIONAL)		
Dimensiones y propiedades mecánicas	Dimensión	460 x 460 x 460 mm	460 x 460 x 560 mm	610 x 610 x 560 mm
	Dimensión (con bowden y bobina)	460 x 560 x 750 mm	460 x 560 x 850 mm	610 x 710 x 850 mm
	Dimensión de la caja de envío	500 x 500 x 500 mm	530 x 530 x 660 mm	680 x 680 x 660 mm
	Estructura	Estructura monopieza de aluminio con pintura electrostática		
	Peso de la caja de envío	12 kg.	36 kg.	42 kg.
	Vibraciones	Inferiores a 2.5 m/s ²		
Potencia	Suministro eléctrico	230 V AC; 50/60 Hz		
		Printersys 320 1,10 A; 150 W max.	Printersys 325 1,20 A; 180 W máx.	Printersys 340 1,30 A; 200 W max.
Condiciones ambientales y ruido	Temperatura de operación	10 - 45 °C ver especificaciones de cada material para resultados óptimos		
	Ruido durante impresión	40 dBA		
	Ruido en Standby	0 dBA		
Software	Software de laminado	Simplify3D (recomendado), Slic3r y Cura (El módulo de conectividad Cloud habilita en la impresora 3D su propio laminador para no depender del uso de un ordenador externo)		
	Sistemas operativos	Windows, macOS y Linux		
	Tipo de archivos para laminado	.stl y .obj		
	Archivo de impresión	.gcode		
Legal	Homologación	Marcado de Conformidad Europeo (CE)		



9.2. Fitxa tècnica Creality Ender 3

Ender-3 Machine Parameter

Modeling Technology : FDM (Fused Deposition Modeling)

Printing Size : 220*220*250mm Machine size: 440 x 410 x 465 mm

Package Size : 510*400*190mm

Package weight : 8.6kg

Max Traveling Speed : 180mm/s

Filament :1.75mm ABS/PLA,WOOD,FLEXIBLE,Carbon fiber,PA....

Input : AC 100-265V 50-60Hz

Output : DC 24V 15A 360W

Layer Thickness : 0.1-0.4mm

Nozzle diameter : 0.4mm

Precision : ± 0.1 mm

File Format : STL, OBJ, G-Code

Working Mode : Online or SD offline

Max Nozzle Temperature : 255°C

Max Hotbed Temperature : 110°C

9.3. Planols provetes

